



**Hugo Miguel Martins Chagas Machado**

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

**Influência do efeito combinado de  
hidrófugo, temperatura e tempo de  
repouso nas propriedades do *grout* no  
estado fresco**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Doutor Fernando Jorge Fernandes Jorne,  
Investigador Pos-Doc FCT-UNL.  
Co-orientador: Doutor Fernando Manuel Anjos Henriques,  
Professor Catedrático, FCT-UNL.

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Armando Manuel Sequeira Nunes Antão  
Arguente: Prof. Doutor Luís Gonçalo Correia Baltazar  
Vogal: Prof. Doutor Fernando Jorge Fernandes Jorne



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Novembro de 2018**



“Copyright” Hugo Miguel Martins Chagas Machado, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao Professor Doutor Fernando Jorne pela oportunidade concedida para o desenvolvimento deste estudo. Agradecer ainda pela partilha de conhecimento, por todo o apoio e acompanhamento dos trabalhos que constituíram a campanha experimental.

Agradeço desde já ao Engenheiro Vitor Silva por todo o auxílio prestado durante a campanha experimental, pela sua disponibilidade, e por todo o conhecimento transmitido que certamente me será útil na minha futura carreira profissional.

Gostaria de deixar um especial agradecimento ao meu colega José Barros, com quem desenvolvi este estudo em conjunto com a sua dissertação, por todas as horas dedicadas em laboratório para o desenvolvimento dos ensaios e por todo o apoio que me deu durante a preparação e realização da campanha experimental.

Aos meus amigos que me ajudaram a durante todo o meu percurso académico. Sem o seu apoio incondicional não teria sido capaz de cumprir este percurso, em particular, à minha namorada, Alexandra Soares e ao Miguel Nogueira por toda a ajuda, suporte e incentivos que me levaram a continuar.

Por último, á minha tia Maria de Lurdes, a quem dedico este trabalho.



## RESUMO

A necessidade de reabilitação de edifícios tem vindo a ganhar importância, sendo, nos dias correntes, uma das principais áreas de atuação no ramo da construção. É possível observar, em grande parte das capitais europeias, um vasto número de edifícios degradados, sejam eles de habitação ou monumentos. Devido ao seu valor cultural, patrimonial e arquitetónico, estas edificações devem ser alvo de intervenção com vista à sua conservação.

Atualmente, uma das técnicas utilizadas em alvenarias antigas é a de injeção de *grout* (caldas). Trata-se de uma técnica de consolidação que visa melhorar o comportamento estrutural das paredes de alvenaria, através do aumento da compacidade do núcleo da parede, melhorando o seu comportamento monolítico. Dado que não apresenta impacto aparente no elemento é vista como uma técnica preferencial na reabilitação de edifícios de cariz cultural. O correto desempenho desta técnica depende, essencialmente, da formulação do *grout* e do seu comportamento no seu estado fresco, no que toca à sua fluidez e injetabilidade.

Denota-se uma necessidade em estudar novas formulações, de forma a melhorar as propriedades fundamentais do *grout* no estado fresco, sendo esse o objetivo da presente dissertação, tendo por base outras formulações anteriormente idealizadas. Procurou-se tentar avaliar a influência da temperatura, do tempo de repouso e da quantidade de material hidrófugo (silicone) adicionado à amassadura, em alguns parâmetros fundamentais do *grout* à base de cal hidráulica, no seu estado fresco.

Desenvolveu-se uma campanha experimental, de forma a aferir a influência dos efeitos anteriormente descritos. Várias misturas foram concebidas, sendo seguidamente avaliadas, em termos de injetabilidade, com recurso a um modelo reduzido, denominado de coluna francesa. De modo a examinar o comportamento dos diferentes *grouts* no seu estado fresco foram realizados os ensaios de cone de Marsh, de espalhamento (*mini-slump test*), de estabilidade e de retenção de água.

Para complementar, e com intuito de aprofundar o conhecimento nesta temática, foram também protagonizados alguns ensaios, mais concretamente, os ensaios de resistência à flexão, resistência à compressão, porosidade aberta e retração, para estudar o comportamento no seu estado endurecido.

**Palavras-chave:** cal hidráulica; estado fresco; injeção de *grout*; silicone; temperatura; tempo de repouso





## ABSTRACT

The need for building rehabilitation has been gaining importance, being one of the main areas of activity in the construction industry nowadays. It is possible to observe, in great part of the European capitals, a vast number of degraded buildings, be they of dwelling or monuments. Due to their cultural, patrimonial and architectural value, these buildings must be intervened in order to be preserved.

Currently, one technique applied in ancient masonry is the *grout* injection (caldas). It is a consolidation technique that aims to improve the structural behavior of masonry walls, by increasing the compactness of the wall core, improving its monolithic behavior. Given that it has no apparent impact on the element, it is seen as a preferred technique in the rehabilitation of cultural buildings. The correct performance of this technique depends essentially on the formulation of the *grout* and its behavior in its fresh state, regarding its fluidity and injectability.

There is a need to study new formulations in order to improve the fundamental properties of the *grout* in his fresh state, being that the purpose of this dissertation, based on other formulations previously conducted. It was attempted to evaluate the influence of temperature, resting time and the amount of water-repellent material (silicone) added to the kneading in some fundamental parameters of the hydraulic lime *grout* in its fresh state.

An experimental campaign was developed in order to assess the influence of the previously described effects. Several blends were conceived and then evaluated in terms of injectability, using a reduced model known as the French column. In order to examine the behavior of the different *grouts* in their fresh state, the tests of Marsh cone, of mini-slump test, of stability and of water retention were carried out.

To complement, and with the purpose of deepening the knowledge in this subject, some tests were also applied, namely, the tests of flexion resistance, compressive resistance, open porosity and shrinkage, to study the behavior in its hardened state.

**Keywords:** hydraulic lime; fresh state; *grout* injection; silicone; temperature; resting time



## ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	1
1.1. Motivação e Enquadramento do Tema	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Estrutura e organização da dissertação	3
<b>2. ANÁLISE DO CONHECIMENTO</b>	5
2.1. <i>Grouts</i> para injeção em alvenarias	5
2.1.1. Técnica de injeção de <i>grout</i>	5
2.1.2. Noção de <i>grout</i>	6
2.1.3. Comportamento reológico de <i>grouts</i>	8
2.2. Comportamento do <i>grout</i> no estado fresco	11
2.2.1. Fluides	11
2.2.2. Estabilidade	11
2.2.3. Retenção de água	12
2.2.4. Influência do tempo de repouso	13
2.2.5. Influência da temperatura	14
2.2.6. Injeção	15
2.3. Comportamento do <i>grout</i> no estado endurecido	17
2.4. Adjuvantes e adições	18
2.4.1. Superplastificante	18
2.4.2. Silicone	21
2.4.2.1. Molhabilidade e ângulo de contacto	23
2.4.2.2. Efeito de sucção capilar	24
<b>3. CAMPANHA EXPERIMENTAL</b>	27
3.1. Composição do <i>grout</i>	27
3.1.1. Materiais utilizados na composição do <i>grout</i>	28
3.1.2. Procedimento de mistura	32
3.1.3. Formulação dos <i>grouts</i> a analisar	34
3.2. Ensaio realizados no estado fresco	35
3.2.1. Ensaio de Cone de Marsh	35
3.2.2. Ensaio de espalhamento	37

3.2.3.	Ensaio de estabilidade .....	38
3.2.4.	Ensaio de retenção de água .....	40
3.2.5.	Ensaio de injetabilidade - modelo de coluna francesa .....	41
3.3.	Ensaos realizados no estado endurecido .....	47
3.3.1.	Ensaio de resistência à flexão .....	48
3.3.2.	Ensaio de resistência à compressão .....	49
3.3.3.	Ensaio de porosidade aberta .....	50
3.3.4.	Ensaio de retração.....	52
<b>4.</b>	<b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>55</b>
4.1.	Introdução .....	55
4.2.	Avaliação das propriedades do <i>grout</i> no estado fresco .....	55
4.2.1.	Ensaio de cone de Marsh .....	55
4.2.2.	Ensaio de espalhamento.....	58
4.2.3.	Ensaio de retenção de água .....	60
4.2.4.	Ensaio de estabilidade .....	62
4.2.5.	Ensaio de injeção em coluna francesa .....	66
4.2.5.1.	Injeção com material arenoso .....	66
4.2.5.2.	Injeção com material cerâmico .....	72
4.3.	Avaliação das propriedades do <i>grout</i> no estado endurecido .....	77
4.3.1.	Ensaos de resistência à flexão e compressão .....	77
4.3.2.	Ensaio de porosidade aberta .....	79
4.3.3.	Ensaio de retração.....	80
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....</b>	<b>87</b>
5.1.	Conclusões relativas às propriedades do <i>grout</i> .....	87
5.2.	Sugestões para desenvolvimentos futuros.....	90
<b>6.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>92</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: injeção de grout em alvenaria .....	5
Figura 2.2: curvas de fluxo para os diferentes tipos de fluido.....	9
Figura 2.3: Curva de fluxo para o comportamento tixotrópico de um fluido .....	10
Figura 2.4: Fenómenos de exsudação e segregação .....	12
Figura 2.5: Evolução da tensão de cedência e viscosidade plástica do grout em função da temperatura .....	14
Figura 2.6: Propriedades a estudar previamente à realização da injeção de grout .....	16
Figura 2.7: Área disponível entre as partículas do meio poroso para um fluido newtoniano (água) e para um fluido binghamiano (grout) .....	17
Figura 2.8: Efeito combinado das forças de repulsão electrostáticas e impedimento esférico..	19
Figura 2.9: Alteração química produzida numa superfície polar devido à aplicação de silicone .....	23
Figura 2.10: Diferentes ângulos de contacto formados entre uma gota de um líquido e superfície de um sólido .....	24
Figura 2.11: Efeito da alteração do ângulo de contacto sobre o comportamento do grout .....	25
Figura 3.1: Cal hidráulica HL5 utilizada na formulação dos diferentes grouts.....	28
Figura 3.2: Distribuição da granulometria da cal HL5.....	29
Figura 3.3: Adjuvantes utilizados para a formulação dos grouts: superplastificante (esq.) e silicone (dir.) .....	32
Figura 3.4: Hélice utilizada para mistura do grout (esq.) e mistura do grout (dir.).....	33
Figura 3.5: Fases do processo de mistura (da direita para a esquerda): a) mistura de 100% ligante com 70% de água; b) adição de superplastificante; c) adição de silicone; d) produto final .....	33
Figura 3.6: Esquema de ensaio de cone de Marsh .....	36
Figura 3.7: Esquema de ensaio de espalhamento (cilindro e placa graduada) .....	37
Figura 3.8: Realização do ensaio de espalhamento (esq.) e resultado do ensaio (dir.) .....	38
Figura 3.9: Esquema representativo do ensaio de estabilidade .....	40
Figura 3.10: Ensaio de retenção de água (esq.) e esquema representativo do ensaio (dir.) .....	41
Figura 3.11: Granulometrias das areias estudadas: a) Muito fino; b) fino; c) Médio; d) Grosso	43
Figura 3.12 - Granulometria utilizada para o material cerâmico: Grosso (esq.) e Fino (dir.) .....	43
Figura 3.13: Curvas granulométricas dos meios porosos compostos por areia e material cerâmico .....	44

Figura 3.14: Modelo real de coluna francesa e respectivo esquema de ensaio .....	45
Figura 3.15: Banho concebido para conservação da temperatura do grout.....	47
Figura 3.16: Fabrico dos provetes prismáticos (esq.) e conservação da temperatura durante o processo de cura em estufa e camara frigorifica (direita cima e baixo respetivamente) .....	48
Figura 3.17: Ensaio de resistência à flexão na ZWICK/ROELL Z050 e modo de rotura do provete (dir.).....	49
Figura 3.18: Ensaio de resistência à compressão na ZWICK/ROELL Z050 .....	50
Figura 3.19: Colocação das amostras de grout em estufa para secagem (esq.); Equipamento utilizado para determinação da porosidade aberta (dir.) .....	51
Figura 3.20: Pesagem hidrostática (esq. e meio) e pesagem saturada (dir.).....	51
Figura 3.21: Remoção do volume para formação da cavidade para posterior introdução de grout para ensaio.....	53
Figura 3.22: Introdução de grout na cavidade do meio poroso após a secagem .....	53
Figura 3.23: Colocação das amostras em camara frigorifica (esq.) e estufa (meio) para cura; Totalidade das amostras ensaiadas (dir.).....	54
Figura 4.1: Resultados alcançados para o fator de fluidez do grout a 5°C com 2% superplastificante e com diferentes dosagens de silicone para diferentes tempos de repouso ....	56
Figura 4.2: Resultados alcançados para o fator de fluidez do grout a 20°C com 2% superplastificante e com diferentes dosagens de silicone para diferentes tempos de repouso ....	56
Figura 4.3: Resultados alcançados para o fator de fluidez do grout a 40°C com 2% superplastificante e com diferentes dosagens de silicone para diferentes tempos de repouso ....	57
Figura 4.4: Resultados alcançados para o diâmetro de espalhamento do grout a 5°C com 2% superplastificante com diferentes dosagens de silicone e diferentes tempos de repouso .....	59
Figura 4.5: Resultados alcançados para o diâmetro de espalhamento do grout a 20°C com 2% superplastificante com diferentes dosagens de silicone e diferentes tempos de repouso .....	59
Figura 4.6: Resultados alcançados para o diâmetro de espalhamento do grout a 40°C com 2% superplastificante com diferentes dosagens de silicone e diferentes tempos de repouso .....	59
Figura 4.7: Resultados alcançados para o ensaio de retenção de água para os diferentes grouts formulados.....	61
Figura 4.8: Resultados alcançados para a variação da massa volúmica dos grouts a 5°C no ensaio de estabilidade.....	63
Figura 4.9: Resultados alcançados para a variação da massa volúmica dos grouts a 20°C no ensaio de estabilidade.....	63
Figura 4.10: Resultados alcançados para a variação da massa volúmica dos grouts a 40°C no ensaio de estabilidade.....	64
Figura 4.11: Curvas de injetabilidade obtidas para os grouts a 5°C e tempo de repouso de 0 minutos em meio poroso arenoso.....	67

Figura 4.12: Curvas de injetabilidade obtidas para os grouts a 5°C e tempo de repouso de 60 minutos em meio poroso arenoso.....	67
Figura 4.13: Curvas de injetabilidade obtidas para os grouts a 20°C e tempo de repouso de 0 minutos em meio poroso arenoso.....	69
Figura 4.14: Curvas de injetabilidade obtidas para os grouts a 20°C e tempo de repouso de 60 minutos em meio poroso arenoso.....	69
Figura 4.15: Curvas de injetabilidade obtidas para os grouts a 40°C e tempo de repouso de 0 minutos em meio poroso arenoso.....	71
Figura 4.16: Curvas de injetabilidade obtidas para os grouts a 40°C e tempo de repouso de 60 minutos em meio poroso arenoso.....	71
Figura 4.17: Curvas de injetabilidade obtidas para os grouts a 5°C e tempo de repouso de 0 minutos em meio poroso cerâmico.....	73
Figura 4.18: Curvas de injetabilidade obtidas para os grouts a 5°C e tempo de repouso de 60 minutos em meio poroso cerâmico.....	73
Figura 4.19: Curvas de injetabilidade obtidas para os grouts a 20°C e tempo de repouso de 0 minutos em meio poroso cerâmico.....	75
Figura 4.20: Curvas de injetabilidade obtidas para os grouts a 20°C e tempo de repouso de 60 minutos em meio poroso cerâmico.....	75
Figura 4.21: Curvas de injetabilidade obtidas para os grouts a 40°C e tempo de repouso de 0 minutos em meio poroso cerâmico.....	76
Figura 4.22: Curvas de injetabilidade obtidas para os grouts a 40°C e tempo de repouso de 60 minutos em meio poroso cerâmico.....	76
Figura 4.23: Registo das dimensões de afastamento, fenda e profundidade nas amostras de grout .....	81
Figura 4.24: Abatimento apresentado no centro da amostra de grout.....	82
Figura 4.25: Grout com 1,2% superplastificante concebido a 20°C .....	83
Figura 4.26: Retração apresentada pelo grout com 2% superplastificante, traço 1:4 (silicone/água), concebido a 5°C.....	84
Figura 4.27: Retração apresentada pelo grout com 2% superplastificante, traço 1:6 (silicone/água), concebido a 20°C.....	84
Figura 4.28: Retração apresentada pelo grout com 2% superplastificante, traço 1:2 (silicone/água), concebido a 40°C.....	85





## INDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Requisitos necessários para assegurar a qualidade dos grouts de injeção .....	8
Tabela 3.1: Ensaios realizados para caracterização do grout .....	27
Tabela 3.2: Características da cal hidráulica HL5.....	28
Tabela 3.3: Densidade e finura da cal HL5 usando o permeâmetro Blaine .....	29
Tabela 3.4: Caracterização química da cal HL5 de acordo com os resultados XRF.....	29
Tabela 3.5: Características do superplastificante .....	30
Tabela 3.6: Características do silicone SL3000 conforme indicado na ficha técnica do fabricante .....	31
Tabela 3.7: Diferentes grouts formalizados para estudo .....	34
Tabela 3.8: Designação e dimensão das areias da marca AREIPOR e material cerâmico.....	42
Tabela 3.9: Composição dos meios porosos adotados .....	43
Tabela 3.10: Baridade e porosidade dos diferentes materiais granulares analisados .....	44
Tabela 3.11 - Características do meio poroso composto por material cerâmico.....	45
Tabela 3.12: Classificação do grout quanto à injetabilidade.....	46
Tabela 3.13 - Características da argamassa que compõe o meio poroso.....	52
Tabela 4.1: Classificação da injetabilidade dos grouts concebidos a 5°C.....	68
Tabela 4.2: Classificação da injetabilidade dos grouts concebidos a 20°C.....	70
Tabela 4.3: Classificação da injetabilidade dos grouts concebidos a 40°C.....	72
Tabela 4.4: Classificação da injetabilidade dos grouts concebidos a 5°C.....	74
Tabela 4.5: Classificação da injetabilidade dos grouts concebidos a 20°C.....	75
Tabela 4.6: Classificação da injetabilidade dos grouts concebidos a 40°C.....	77
Tabela 4.7: Resultados obtidos para as tensões de resistência à flexão e resistência à compressão para as diferentes misturas de grout .....	78
Tabela 4.8 - Resultados obtidos por Jorne (2016) e Neno (2016) para grouts com 1,2% superplastificante.....	79
Tabela 4.9: Resultados obtidos para a porosidade aberta das diferentes misturas de grout .....	79
Tabela 4.10: Valores de porosidade aberta obtidos por Jorne (2016) e Neno (2016) para grouts com 1,2% superplastificante concebidos a diferentes temperaturas .....	80
Tabela 4.11: Classificação da retração dos diferentes grouts.....	82
Tabela 5.1: Classificação dos grouts quanto à injetabilidade em areia .....	88
Tabela 5.2: Classificação dos grouts quanto à injetabilidade em material cerâmico .....	89











# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Motivação e Enquadramento do Tema

A necessidade de reabilitação de edifícios tem vindo a ganhar importância, sendo, nos dias correntes, uma das principais áreas de atuação no ramo da construção. É possível observar, em grande parte das capitais europeias, um vasto número de edifícios degradados, sejam eles de habitação ou monumentos. A grande maioria destes edifícios apresenta anomalias ao nível das alvenarias. Estas alvenarias são em grande parte constituídas por três panos, dois paramentos exteriores resistentes e um central (núcleo) (Vintzileou, 2011). As principais anomalias são encontradas ao nível do núcleo, composto por material irregular e argamassas (Vintzileou, 2011), dispostos de forma heterogénea, que ao longo do tempo se foram deteriorando, promovendo a descontinuidade entre os dois panos exteriores, perdendo-se desta forma o comportamento monolítico do elemento.

Uma das técnicas utilizadas em alvenarias antigas é a de injeção de caldas (*grout*) (Kalagri et al., 2010; Vintzileou, 2011). Trata-se de uma técnica de consolidação que visa melhorar o comportamento estrutural das paredes de alvenaria, através do aumento da compacidade do núcleo da parede, melhorando o seu comportamento estrutural. O desempenho desta técnica irá depender, essencialmente, da formulação do *grout* e do seu comportamento no seu estado fresco, no que toca à sua fluidez e injetabilidade, como também das características do elemento alvo da intervenção. O recurso a esta técnica, quando bem-sucedida, permite através do preenchimento dos vazios e fendas do núcleo um aumento da sua coesão e compacidade do núcleo da parede, proporcionando a ligação entre os dois panos exteriores e melhorando o comportamento monolítico do elemento. Deste modo, as resistências do elemento às ações a que se encontra sujeito são consideravelmente melhoradas (Binda, 1997; Miltiadou-Fezans & Tassios, 2013).

Para uma intervenção deste tipo existem alguns cuidados que deverão ser tidos previamente em conta. O carácter irreversível é uma condicionante de extrema importância para este tipo de técnica de reabilitação, logo, previamente à sua aplicação deverá ser conduzido um estudo prévio com vista a definir quais os materiais que apresentam melhor compatibilidade, tanto física como química, com os materiais originais do elemento. A utilização de materiais inadequados poderá conduzir ao fracasso da intervenção, podendo originar danos superiores aos existentes inicialmente.

Tendo em conta os aspetos mencionados, um dos materiais passíveis de utilizar como ligante na formulação do *grout* é a cal hidráulica. Este tipo de ligante apresenta uma maior

compatibilidade com o elemento a reabilitar do que ligantes como o cimento, dada a sua proximidade com as propriedades químicas, físicas e mecânicas com os materiais existentes na parede. Logo, a injeção de *grouts* à base de cal hidráulica considera-se como um técnica eficaz para restabelecer a continuidade e coesão do elemento, melhorando as suas resistências (Kalagri et al., 2010).

Apesar de tudo existem alguns parâmetros fundamentais que devem ser alvo de análise de forma a incrementar o sucesso deste tipo de intervenção, estando estes parâmetros associados à formulação do *grout*. No âmbito desta dissertação serão analisados alguns destes parâmetros e qual a sua influência nas propriedades fundamentais do *grout* no seu estado fresco e endurecido. Os parâmetros analisados são a temperatura, o tempo de repouso e adição de silicone, introduzido no processo de amassadura do *grout* em diferentes quantidades.

Diferentes temperaturas serão passíveis de ser registadas, dada à distribuição geográfica dos edifícios e os diferentes climas em que se encontram inseridos. A temperatura é um parâmetro que apresenta grande influência nos *grouts* à base de cal hidráulica, em particular nas suas propriedades reológicas (Baltazar, 2014), ou seja, nas suas propriedades no estado fresco. A temperatura apresenta grande influência não só a nível das propriedades fundamentais do *grout* no estado fresco, como também no seu processo de cura (Rojas & Cabrera, 2002), pois a cura deste tipo de ligante depende do seu processo de hidratação.

Relativamente à fluidez do *grout*, o tempo de repouso, ou seja, o tempo que decorre entre a mistura do *grout* e a sua injeção, deverá ser um aspeto alvo de estudo. Este parâmetro apresenta influência na fluidez das caldas, pois com o decorrer do tempo o estado de hidratação será incrementado aumentando consideravelmente a viscosidade do *grout*, comprometendo o sucesso da injeção (Guerreiro, 2014; Jorne, 2016; Neno, 2016).

Os *grouts* para injeção em alvenarias podem ser vistos como simples misturas entre água e ligante. Contudo existem alguns materiais que podem ser adicionados – adjuvantes - de forma a melhorar algumas das características fundamentais dos *grouts*. Um desses materiais é o superplastificante, que ao ser adicionado em quantidade adequada melhora o desempenho da calda ao nível da fluidez devido à sua ação repulsiva capaz de desflocular as partículas da mistura. Este material configura-se como essencial para este tipo de intervenção de consolidação. Outro adjuvante passível de ser adicionado é o silicone. Trata-se de um material hidrófugo, de aplicação em superfícies, que dadas as suas características possibilita uma redução da quantidade de água absorvida pelo meio poroso através da alteração do ângulo de contacto entre o meio e o *grout* (Henriques, 2011; Telha, 2015). Dando seguimento a estudos realizados anteriormente por outros



autores (Neno, 2016), no âmbito desta dissertação procura-se analisar qual a dosagem ótima de silicone a ser adicionado diretamente no processo de amassadura do *grout*, de forma a melhorar a performance da técnica nas suas vertentes essenciais de injetabilidade e durabilidade.

## 1.2. Objetivos

Estudos anteriores foram desenvolvidos no âmbito da adição de material hidrófugo na mistura de *grouts* de injeção (Miguel, 2017; Neno, 2016; Silva, 2016). Porém, a falta de conhecimento relativo à influência de alguns aspetos relacionados com este tipo de adição, configuram-se como motivos incentivadores no desenvolvimento de estudos nesta temática.

Posto isto, a presente dissertação apresenta como principal objetivo estudar a influência da adição de diferentes quantidades de material hidrófugo (silicone) nas propriedades fundamentais do *grout* à base de cal hidráulica, no seu estado fresco. Assim, procura-se determinar qual a quantidade mais adequada de silicone, que combinada com a ação de superplastificante, da temperatura e do tempo de repouso, que torna mais eficaz a injeção de *grout* em determinado meio poroso.

As características obtidas no estado fresco são posteriormente correlacionadas com os resultados obtidos em ensaios no estado endurecido, para assim se conseguir obter uma melhor e mais completa caracterização de cada uma das novas composições de *grout* analisadas neste estudo.

## 1.3. Estrutura e organização da dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada segundo cinco capítulos sendo o primeiro apenas de carácter introdutório constituído pelo enquadramento do tema, objetivos do trabalho desenvolvido e organização da dissertação.

No segundo capítulo é feita uma abordagem teórica relativo ao conhecimento existente fundamentado em bibliografia. Pretende-se neste capítulo introduzir alguns fundamentos e observações essenciais obtidas em outros trabalhos de forma a melhorar a compreensão deste estudo.

No terceiro capítulo é efetuada a descrição da campanha experimental desenvolvida no âmbito da presente dissertação, descrevendo-se todos os materiais e equipamentos utilizados, como também

procedimentos dos ensaios laboratoriais realizados para a caracterização do *grout* no estado fresco e endurecido.

No quarto capítulo apresenta-se a globalidade dos resultados alcançados durante a campanha experimental bem como a análise detalhada dos mesmos.

No quinto e último capítulo são apresentadas as conclusões finais do autor sendo propostas algumas ideias para o desenvolvimento de estudos futuros.

## 2. ANÁLISE DO CONHECIMENTO

### 2.1. *Grouts* para injeção em alvenarias

#### 2.1.1. Técnica de injeção de *grout*

Uma das técnicas mais aplicadas atualmente no reforço e reparação de paredes de alvenaria, é a de injeção de *grout* (Vintzileou, 2011). Trata-se de uma técnica de consolidação estrutural, que consiste no preenchimento de vazios no interior do núcleo de paredes de alvenaria de pano múltiplo, recorrendo à injeção de caldas com elevada fluidez através de furos previamente realizados na parede que permitirão a penetração no seu interior. Após aplicada a técnica, o *grout* irá endurecer no interior da parede, garantindo o aumento da coesão do material do núcleo e a ligação entre os panos de alvenaria exteriores e interior (Ignoul et al., 2004). O adequado preenchimento dos vazios, conferindo a ligação entre os múltiplos panos, a homogeneização das diferentes propriedades mecânicas dos seus constituintes, a recuperação do seu comportamento monolítico e o aumento da resistência mecânica global do elemento, são os principais objetivos deste tipo de intervenção (Telha, 2015).



Figura 2.1: injeção de *grout* em alvenaria (Brás, 2011)

Um dos pontos fortes deste tipo de intervenção é não ter impacto aparente no exterior da alvenaria. Porém, é uma solução que apresenta um carácter irreversível, visto que após aplicação não existe a possibilidade de remoção do material injetado.

O recurso a esta técnica apresenta também alguns condicionalismos que poderão comprometer o sucesso da intervenção (Binda et al., 2006), tais como:

- Dificuldade de penetração do *grout* em aberturas inferiores a 2-3mm;
- Perda de fluidez e consequente segregação e retração do *grout*, causadas pela absorção de água dos constituintes da parede;

- Necessidade de injeção a baixa pressão de modo a eliminar a presença de ar nos vazios e mesmo evitar a rotura da alvenaria;
- Dificuldade de penetração do *grout* especialmente na presença de materiais porosos.

De forma a maximizar o sucesso da intervenção, considera-se de extrema importância a realização de um estudo prévio não só da calda a injetar, como também da parede alvo da intervenção, com o objetivo de conhecer o seu comportamento estrutural e as propriedades físicas e químicas dos materiais na sua composição (Valluzzi, 2009). Torna-se assim possível concluir que existem diversos fatores que influenciam a capacidade de penetração do *grout*, associados não só à morfologia da parede (por exemplo, a capacidade de absorção de água) como à composição da mistura a injetar (por exemplo, o tipo de ligante a usar) (Guerreiro, 2014).

### 2.1.2. Noção de *grout*

As caldas têm sido correntemente utilizadas em intervenções de reparação e consolidação de elementos construtivos danificados, nomeadamente paredes de alvenaria antiga de pano múltiplo. Este tipo de paredes por vezes apresentam um aparente bom aspeto exterior, e no entanto, um elevado grau de degradação ao nível do seu núcleo, pondo em causa a sua estabilidade estrutural. Deste modo, caldas mais fluidas ao possuírem elevada capacidade de penetração, são correntemente utilizadas em intervenções de consolidação e reparação. A aplicação destas caldas é feita por intermédio de injeção a baixas pressões, de forma a não danificar o elemento e com o objetivo de tentar preencher o máximo de vazios e fendas possível. Segundo Luso (Luso, 2012) e tendo em conta a sua forma de aplicação, este tipo de mistura pode ser designada por *grout* (designação em inglês). Toumbakari propõe a seguinte definição: “*Uma calda ou grout de injeção é uma argamassa utilizada no preenchimento, homogeneização, consolidação e/ou melhoria das propriedades mecânicas de sistemas que apresentem cavidades, vazios, fendas ou falta de coesão ou de sistemas totalmente não coesos*” (Toumbakari, 2002).

Segundo Baltazar (2014), os *grouts* podem ser vistos como suspensões com considerável fluidez de modo a poderem ser facilmente bombeados e fluir pelas fissuras e vazios existentes na alvenaria. Estas suspensões são principalmente constituídas, na sua forma mais simplificada, apenas por água e ligante, podendo por vezes possível a adição de adjuvantes, como por exemplo os superplastificantes. Estes adjuvantes e outras adições conferem aos *grouts* alterações que potenciam as suas propriedades no estado fresco, e endurecido, de forma a maximizar a qualidade da intervenção de consolidação.

Para a escolha das especificações do *grout* é necessário um conhecimento profundo sobre a capacidade de escoamento dentro do núcleo da alvenaria e a compatibilidade física e química dos materiais existentes nas edificações antigas (Jorne et al., 2015). Deste modo, a escolha do tipo de ligante a usar para o fabrico do *grout*, é considerado como o principal critério no estudo da sua composição. O desenvolvimento de potenciais incompatibilidades com os materiais constituintes das paredes de alvenaria onde o *grout* irá ser aplicado, é um problema que pode no futuro por em causa a qualidade da intervenção. O recurso a ligantes com propriedades o mais próximo possível dos materiais originais constituintes do suporte, sendo o caso de ligantes como a cal aérea e a cal hidráulica, constitui o melhor princípio a adotar na escolha do ligante de forma a incrementar a durabilidade da intervenção. Este tipo de ligantes conferem aos *grouts* maiores compatibilidades químicas, físicas e mecânicas com o suporte, comparativamente aos de base de cimentícia ou resinas orgânicas, que apresentam algumas incompatibilidades com suportes antigos, sendo esta a principal causa na recusa deste material (Binda, 1997; Bras & Henriques, 2012; Miltiadou-Fezans & Tassios, 2012; Valluzzi, 2009; Van Rickstal, 2000).

Quando considerada a utilização exclusiva de cal aérea como ligante na composição do *grout*, a elevada espessura das paredes de alvenaria dos edifícios antigos leva à existência de um baixo teor de dióxido de carbono no seu interior, o que faz com que o processo de carbonatação da cal seja lento e, conseqüentemente, o endurecimento seja muito demorado, por vezes ao longo de vários anos, ou podendo mesmo o processo de hidratação não ocorrer na sua totalidade (Rodrigues, 2004). Este fator revela-se o principal entrave à aplicação de caldas de injeção exclusivamente à base de cal aérea, apesar de ser a mais compatível entre as restantes cals. Relativamente à cal hidráulica, a presa e o endurecimento compreende duas fases. A primeira correspondente à hidratação dos silicatos de cálcio e aluminatos de cálcio ao ar e submerso em água, e a segunda é dada pela recarbonatação da cal apagada apenas na presença de dióxido de carbono (Matos, 2013). Em termos práticos, a cal hidráulica apesar de apresentar uma menor compatibilidade com o suporte que a cal aérea será sempre a melhor opção a adotar.

A conceção do *grout* deve obedecer a uma série de requisitos para um adequado desempenho a nível de injetabilidade, resistência e durabilidade de alvenarias antigas. Estes requisitos, descritos na tabela 2.1, estão na base de uma abordagem geral da estrutura a ser reparada, antes e depois da intervenção (Binda, 1997).

Tabela 2.1: Requisitos necessários para assegurar a qualidade dos *grouts* de injeção (Binda, 1997)

Requisitos Reológicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Pretende-se fluidez durante o processo de injeção e capacidade de penetração uniforme de modo a que haja um completo preenchimento dos vazios de igual forma (injetabilidade – propriedades caracterizadas pela homogeneidade, ausência de grumos, com granulometria inferior à dimensão dos vazios a preencher, baixa viscosidade, baixo ângulo de contacto, etc.);</li> </ul>
Requisitos Químicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Deve ter características químicas estáveis no tempo, isto é, ser capaz de formar ligações químicas fortes com o material existente, através de reações irreversíveis;</li> <li>▪ Deve ter resistência aos sais de sulfato, de modo a evitar a formação de produtos expansivos e eflorescências.</li> </ul>
Requisitos Físicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ausência de segregações (para evitar heterogeneidades);</li> <li>▪ Exsudação deve ser mínima (para diminuir presença de vazios quando a mistura estiver no estado endurecido);</li> <li>▪ O tempo de início de presa deve ser adequado ao tempo necessário à execução da injeção;</li> <li>▪ As propriedades higroscópicas devem ser caracterizadas por insolubilidade em água e estabilidade volumétrica na presença de humidade;</li> <li>▪ Deve possuir baixa retração.</li> </ul>
Requisitos Mecânicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Deve ter características mecânicas e de rigidez similares aos materiais originais ou apenas ligeiramente superiores;</li> <li>▪ Deve ter boa e adequada aderência ao suporte para o bom funcionamento do conjunto.</li> </ul>

### 2.1.3. Comportamento reológico de *grouts*

As primeiras noções sobre reologia surgem por Newton em 1687, o qual defendia que “a resistência que surge devido à ausência de deslizamento entre as partes do líquido, sendo as restantes coisas iguais, é proporcional à velocidade em que as partes do líquido são separadas umas das outras”. Salienta-se, que esta resistência ao fluxo é atualmente designada por viscosidade (Vikan, 2005). Em 1929, surge uma nova definição, por Eugene Bingham, que estabeleceu o que atualmente se considera como definição de reologia: “*ciência que estuda o escoamento e deformação dos materiais*”.

Sendo a viscosidade dos materiais uma das grandezas fortemente afetada por parâmetros como a temperatura, a pressão e a taxa de corte (Miguel, 2017), torna-se desta forma relevante

diferenciar os fluidos afetados pelos parâmetros enunciados, através das seguintes designações (figura 2.2):

- Fluido Newtoniano: a viscosidade não se altera com a aplicação de uma taxa de corte nem apresentam propriedades elásticas.
- Fluido não Newtoniano: a viscosidade depende da taxa de corte aplicada e não do tempo de corte. Podem ser de três tipos diferentes – reofluidificantes, reoespesantes e de Bingham.

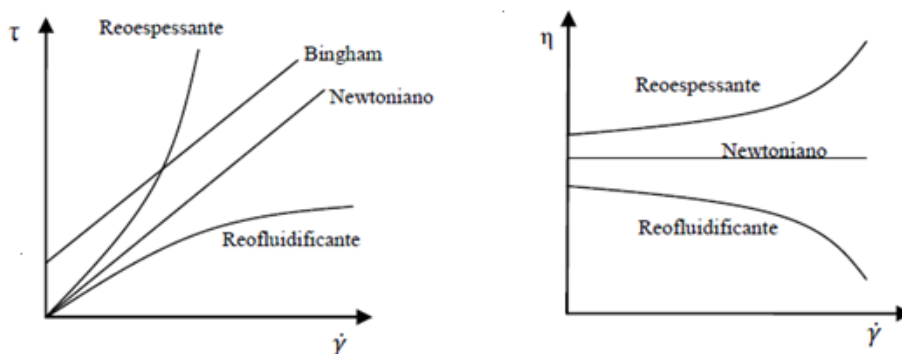


Figura 2.2: curvas de fluxo para os diferentes tipos de fluido (Matos, 2013)

Um fluido reofluidificante é aquele cuja viscosidade decresce com o aumento da taxa de corte. O reoespesante é o fluido cuja viscosidade aumenta com o aumento da taxa de corte. Por último, os fluidos de Bingham, são aqueles que apenas se deformam após determinada taxa de corte, denominada de tensão de cedência (*yield stress*, em inglês), comportando-se seguidamente como um fluido Newtoniano (Cidade, 2005). Segundo Toumbakari (Toumbakari, 2002), de acordo com os valores da relação água/ligante normalmente utilizados na composição do *grout*, este pode ser considerado um fluido com um comportamento viscoelástico não-Newtonianos, por outras palavras, um fluido Binghamiano (Brás, 2011; Baltazar et al., 2013).

Através dos princípios referentes aos diferentes fluidos e seus comportamentos torna-se possível assumir que para uma dada taxa de corte constante os valores de tensão de corte e viscosidade não sofrem qualquer alteração. Existem todavia, situações mais complexas, em que tal não se verifica. Tratam-se de situações em que o comportamento é caracterizado como tixotrópico (figura 2.3). Este comportamento pode ser entendido pelo decréscimo contínuo da viscosidade do material quando se encontra submetido a uma dada tensão, e após a remoção desta, o material é capaz de restabelecer a sua estrutura original e viscosidade inicial. Assim, a tixotropia apresenta-se como um comportamento com caráter reversível que se encontra diretamente relacionado com o tempo de repouso do material. No caso das caldas de injeção esta recuperação estrutural pode não ser total (Cardoso, 2015).

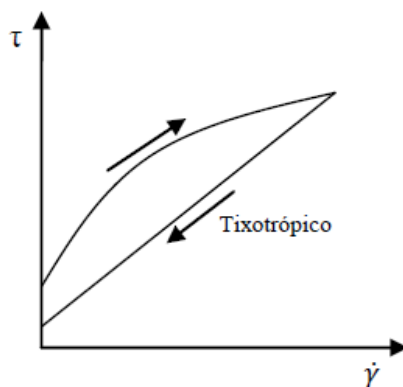


Figura 2.3: Curva de fluxo para o comportamento tixotrópico de um fluido (Cardoso, 2015)

Tendo em vista a realização de uma injeção bem-sucedida é fundamental efetuar um controlo adequado das propriedades associadas ao comportamento reológico do *grout* no estado fresco, nomeadamente a fluidez, capacidade de retenção de água e estabilidade. Desta forma, considera-se que uma escolha criteriosa dos materiais constituintes do *grout*, e respetivas dosagens, é essencial para o controlo das propriedades mencionadas.

A avaliação da capacidade de escoamento de um *grout*, do ponto de vista reológico, está diretamente relacionado com duas grandezas: a tensão de cedência e a viscosidade plástica (Guerreiro, 2014). A tensão de cedência (*yield stress*) encontra-se diretamente relacionada com a maior ou menor facilidade do *grout* começar a fluir quando sujeito a determinada tensão, sendo o valor mínimo necessário a aplicar para que o escoamento se inicie. Logo, esta grandeza tem influência ao nível do escoamento como também na capacidade de penetração do meio a injetar (Guerreiro, 2014). Relativamente à viscosidade plástica, esta grandeza traduz a resistência ao fluxo, permitindo retirar conclusões sobre a resistência ao escoamento, ou seja, a maior ou menor dificuldade do *grout* fluir através dos vazios do meio em que está a ser aplicado (Baltazar et al, 2013b). Um valor elevado de viscosidade plástica, que resulta das interações entre as partículas coloidais excessivas de suspensão, origina uma maior dificuldade de fluxo (Baltazar et al., 2013b).

É importante também referir que os *grouts* à base de ligantes hidráulicos possuem um comportamento reológico muito complexo, sofrendo variações com o decorrer do tempo devido à hidratação das partículas de ligante, e consequentemente variações na viscosidade, até ao instante em que adquirem resistências mecânicas que impossibilitam o escoamento (Míguez, 2017). Em termos práticos, a reologia de um *grout* de injeção caracteriza-se pela sua fluidez (ou trabalhabilidade) e a influência que esta apresenta em parâmetros relacionados com a sua



aplicação, tais como: facilidade de injeção, estabilidade, durabilidade e desenvolvimento de resistências mecânicas.

## 2.2. Comportamento do *grout* no estado fresco

O comportamento dos *grouts* no seu estado fresco pressupõe não só uma análise das suas propriedades reológicas como também o controlo da sua qualidade. Torna-se assim possível estabelecer uma relação entre o comportamento reológico do *grout* e as suas propriedades no estado fresco (Guerreiro, 2014).

Propriedades fundamentais do *grout* no estado fresco como a fluidez, estabilidade e capacidade de retenção de água, devem ser preservadas durante um maior período de tempo possível de forma a incrementar a eficácia da ação de consolidação.

### 2.2.1. Fluidez

Entende-se por fluidez a capacidade do material permanecer, por tempo suficiente, no estado fluido, enquanto ocorre a difusão homogênea através dos vazios do elemento (Valluzzi, 2005). Esta propriedade depende essencialmente da natureza do ligante (distribuição granulométrica e superfície específica das suas partículas), do método de mistura, da quantidade de água utilizada e da quantidade de adjuvantes ou adições introduzidos (Vintzileou, 2006).

Durante o processo de injeção, os *grouts* devem apresentar fluidez e uma capacidade de penetração no meio injetado o mais uniforme possível. Torna-se assim importante garantir, que o *grout* apresente valores reduzidos de tensão de cedência e viscosidade plástica (Guerreiro, 2014). A avaliação da fluidez pressupõe a análise destas duas grandezas, sendo possível afirmar, que comportamento reológico do *grout* no estado fresco surge associado à fluidez, apresentando grande influência na injetabilidade.

### 2.2.2. Estabilidade

Os *grouts* para injeção podem ser vistos como suspensões com elevada fluidez, compostas essencialmente por mistura de água e ligante (Baltazar, 2014). Do ponto de vista da estabilidade, pretende-se que estas misturas mantenham durante todo o processo de injeção uma distribuição uniforme das suas partículas, mantendo-se o mais homogêneas possível. Após o processo de mistura, fenómenos como a exsudação e a segregação, esquematizados na figura 2.4, são capazes

de provocar a instabilidade destas misturas, logo, a estabilidade apresenta-se como uma garantia da manutenção das propriedades essenciais *grout* no estado fresco até à sua cura total (estado endurecido) (Toumbakari, 2005).

A exsudação pode ser entendida como a migração das partículas de água para a superfície do *grout*, formando uma pequena película de água superficial. Fatores capazes de potenciar este processo são a relação água/ligante e a distribuição granulométrica do ligante (Miltiadou-Fezans & Tassios, 2013). Relativamente à segregação, este fenómeno encontra-se associada à rápida disposição das partículas de ligante por precipitação, formando uma mistura estratificada com densidade variável em altura. Este tipo de fenómeno pode ocorrer pois as forças existentes entre as partículas da mistura são vencidas pela força gravítica, fazendo com que a mistura seja incapaz de manter a sua microestrutura (Miltiadou-Fezans & Tassios, 2013). A ocorrência de ambos os fenómenos, separadamente ou em conjunto, originam suspensões heterogêneas incapazes de penetrar eficazmente nos meios em que são injetadas, podendo estar relacionados com fatores como a distribuição granulométrica do ligante e/ou com a relação água/ligante da mistura (Miltiadou-Fezans & Tassios, 2013).



Figura 2.4: Fenómenos de exsudação e segregação (Luso, 2012)

A estabilidade do *grout* deve ser controlada, de modo a evitar a ocorrência de fenómenos de exsudação e/ou segregação de forma excessiva, pois caso contrário, não só a qualidade do *grout* mas de toda a intervenção de consolidação podem ser fortemente afetados (Valluzzi, 2005).

### 2.2.3. Retenção de água

A capacidade de retenção de água pode ser vista como a capacidade de um *grout* em reter a água da mistura durante a sua injeção no interior de alvenarias. Esta capacidade deve ser mantida durante um maior período de tempo possível permitindo que o *grout* preserve um bom comportamento reológico e maior estabilidade, com o intuito de assegurar uma injeção eficaz (Assaad & Daou, 2014).

Ao perder parte da sua água de constituição, para o meio poroso onde estão a ser aplicadas, as caldas formam um mecanismo de bloqueio ao processo de injeção devido ao aumento do atrito interno e colisão entre partículas sólidas. (Brás & Henriques 2012; Van Rickstal 2000). Ocorre assim uma diminuição do grau de dispersão e, conseqüentemente, uma redução da capacidade de injeção (Assaad & Daou, 2014).

De forma a tornar-se possível uma adequada conservação da água de constituição durante as injeções, salienta-se que não deverá ser considerado o aumento do teor em água durante o processo de formulação do *grout*. Esta medida é considerada como prejudicial para o comportamento das caldas no estado fresco, na medida em que conduz a suspensões menos estáveis e com maior probabilidade de ocorrência de fenómenos de exsudação e segregação (Biçer-Simşir, 2009). Como é de esperar, o comportamento das caldas de injeção no estado endurecido também será afetado, pois o aumento do teor em água permite que após totalizadas as reações de hidratação exista água em excesso, que conduz a uma maior porosidade, e uma conseqüente diminuição da resistência mecânica, resultando na redução da eficiência da ação de consolidação.

#### 2.2.4. Influência do tempo de repouso

Entende-se por tempo de repouso como o espaço de tempo que decorre entre o final do processo de mistura do *grout* e o momento da injeção. O tempo de repouso apresenta grande influência no comportamento das caldas de injeção no estado fresco (Guerreiro, 2014).

Caldas à base de cal hidráulica são consideradas como materiais com um comportamento designado como tixotrópico, ou seja, apresentam comportamento reofluidificante dependente do tempo de repouso (Baltazar et al., 2012; Baltazar et al., 2013a). Quando sujeito a uma ação de corte ou tensão, as ligações entre partículas de *grout* são quebradas ocorrendo desfloculação e conseqüente decréscimo da viscosidade plástica e da tensão de cedência (Neno, 2016). Após remoção desta tensão, estando a calda em repouso, é promovida a floculação através da restituição das ligações entre as partículas. Contudo, este tipo de comportamento tixotrópico associado à estrutura interna do material apenas apresenta reversibilidade para um curto período de tempo, dependendo igualmente da temperatura (Mahaut et al., 2008; Roussel & Cussigh, 2008).

Os *grouts* à base de ligantes hidráulicos, ao contrário de outros materiais, apresentam um comportamento reológico bastante complexo influenciado pelo processo de hidratação (Baltazar, 2014), logo, torna-se importante incluir o estudo do tempo de repouso na avaliação do

comportamento do *grout* no estado fresco, nomeadamente na fluidez, e quais as suas consequências na injetabilidade no meio poroso.

#### 2.2.5. Influência da temperatura

Uma eficiente consolidação do núcleo de paredes de alvenaria antigas, recorrendo à injeção de *grout*, depende essencialmente das propriedades inerentes à calda, ou seja, do seu comportamento reológico. Contudo, outras questões como as condições ambientais, em que é efetuada a injeção, têm grande influência no comportamento reológico, nomeadamente a temperatura ambiente (Baltazar, 2014).

O facto da temperatura ambiente não poder ser alterada, apenas prevista, faz com que este parâmetro se torne fundamental no estudo da injetabilidade e durabilidade da técnica, de forma a ser possível escolher a estação do ano mais apropriada à sua aplicação.

As características do *grout* no estado fresco, nomeadamente as propriedades reológicas e comportamento tixotrópico, são influenciados pela temperatura (Hunter, 2001; Yamada et al., 2000; Baltazar, 2014). Pela observação da figura 2.5 (Baltazar, 2014), é possível observar a influência mencionada, através da variação dos valores de viscosidade plástica e de tensão de cedência.

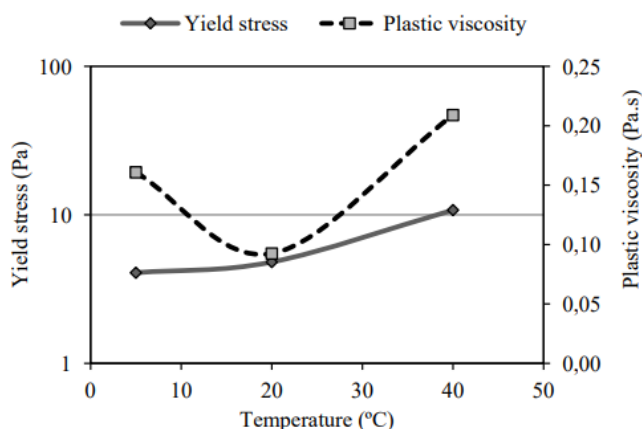


Figura 2.5: Evolução da tensão de cedência e viscosidade plástica do *grout* em função da temperatura (Baltazar, 2014)

Para temperaturas baixas, próximas dos 5°C, resultam elevados valores de viscosidade, e consequentemente de tensão de cedência. Este comportamento deve-se à formação de cristais de gelo devido à proximidade do ponto de congelação da água que promovem forças ligações através

de pontes de hidrogénio (Baltazar, 2014). Além disso, a nível molecular, os movimentos aleatórios das partículas estão diretamente relacionados com a temperatura (movimento Browniano). Para baixas temperaturas os movimentos são mais reduzidos (agitação molecular mais baixa), o que promove uma maior floculação dada a maior aproximação entre as partículas de ligante. Por outro lado, ao contrário de temperaturas baixas, é possível observar que o aumento da temperatura beneficia o comportamento reológico, através da diminuição da viscosidade plástica e da tensão de cedência, resultado do aumento da agitação térmica. Contudo, a partir de determinadas temperaturas (superiores a 20°C), ocorre um aumento significativo destes parâmetros, devido essencialmente à reação cinética mais rápida na hidratação da cal hidráulica e aumento das forças electrostáticas das partículas de cal (Baltazar, 2014; Hunter, 2001). Estes dois fatores promovem uma maior floculação da microestrutura do material e consequente diminuição da fluidez, traduzindo-se no aumento da viscosidade plástica e da tensão de cedência.

Através dos resultados obtidos por Baltazar (2014), apresentados na figura 2.5, é possível constatar que a temperatura à qual o *grout* apresenta melhor desempenho é a de 20°C. Conclusões semelhantes foram também obtidas por outros autores (Neno, 2016; Bras et al 2010; Jorne, 2016).

Considera-se importante mencionar, que o recurso a adjuvantes como o superplastificante pode trazer alguns benefícios para o comportamento do *grout* no estado fresco, tendo em conta a variação da temperatura. Este adjuvante potencia a dispersão das partículas, o que promove o atraso das reações de hidratação e um aumento da fluidez. No entanto, este fator pode perder relevância quando se consideram temperaturas extremas (caso de 5°C e 40°C) (vd. 2.4.1.).

#### 2.2.6. Injeção

Com o objetivo de consolidar o núcleo de paredes de alvenaria antigas e melhorar o seu comportamento estrutural global, restituindo a continuidade entre panos, uniformizando as tensões e restabelecendo o comportamento monolítico original da alvenaria, torna-se absolutamente fulcral que a injeção de *grout* seja bem-sucedida para que a intervenção produza o máximo rendimento possível. O processo de injeção apenas será bem-sucedido se for assegurado um adequado escoamento do *grout* no meio poroso, passando pelo preenchimento do maior número de vazios e fendas no interior do elemento, aumentando a sua homogeneidade e coesão, criando ligações entre os elementos da alvenaria.

A injetabilidade é um dos parâmetros que permite aferir a capacidade de escoamento e preenchimento dos vazios e fendas no interior da alvenaria ao recorrer-se a este tipo de técnica.

Segundo Kalagari (2010), a injetabilidade pode ser o parâmetro chave para que uma intervenção deste tipo seja considerada como eficaz.

Previamente ao processo de injeção, a realização de um estudo que envolva não só o estudo do *grout* e a sua formulação, mas também da alvenaria alvo de intervenção, é de extrema importância. O sucesso de uma injeção depende não apenas das propriedades do *grout* no seu estado fresco mas também das características do meio a consolidar (Valluzzi, 2005). A figura 2.6, apresentada seguidamente, pretende ilustrar quais os aspetos a ter em conta durante a fase de estudo prévio, de forma a se proceder a uma injeção com a máxima eficácia.

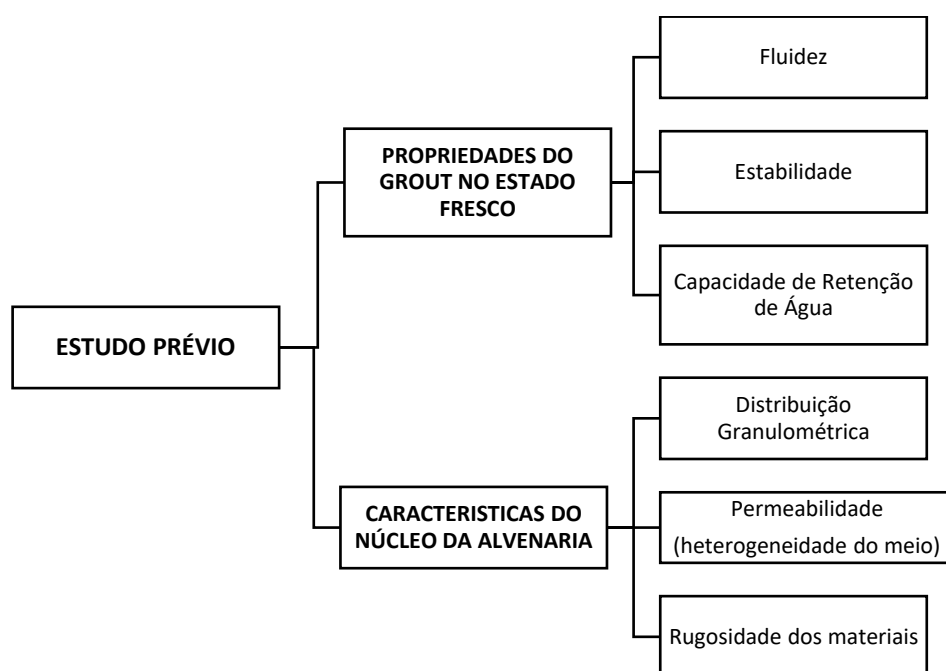


Figura 2.6: Propriedades a estudar previamente à realização da injeção de *grout*

Segundo Van Rickstal (2000), um meio poroso pode ser entendido como um material sólido que apresenta vazios e poros, interligados ou não, dispersos de forma regular ou irregular. Durante o processo de injeção, e enquanto o *grout* flui através da alvenaria, considera-se que os espaços vazios do meio poroso a ser preenchidos são de carácter interparticular (entre partículas) e intraparticular (poros de cada partícula)(Coelho, 2013). Uma tentativa de definir estes diferentes tipos de espaços é bastante importante, dado que estes apresentam grande influência ao nível da injetabilidade (Neno, 2016). As dimensões destes vazios podem ser condicionantes, na medida em que, para dimensões inferiores às apresentadas pelas partículas de ligante (usado na formulação do *grout*), a componente sólida torna-se incapaz de os preencher, penetrando apenas a componente líquida., como ilustrado na figura 2.7 (Jorne et al., 2012).

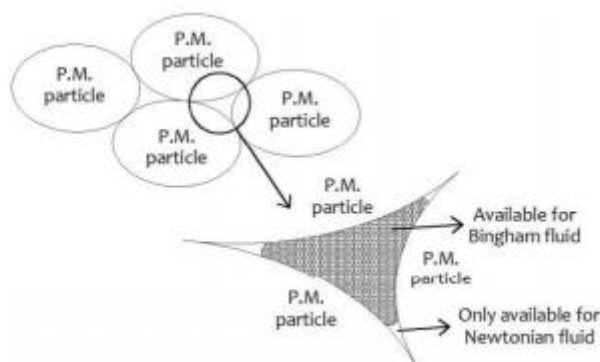


Figura 2.7: Área disponível entre as partículas do meio poroso para um fluido newtoniano (água) e para um fluido binghamiano (*grout*) (Jorne et al 2015b)

Ao contrário da água que apresenta um comportamento Newtoniano, o *grout* ao apresentar um comportamento semelhante ao de um fluido de Bingham irá apresentar uma maior dificuldade em penetrar em zonas em que os vazios são menores. Este tipo de ocorrência promove a heterogeneidade da mistura devido à absorção da água de constituição por parte destes poros de reduzidas dimensões, influenciando a fluidez do *grout* devido ao aumento da viscosidade, que consequentemente reduz a injetabilidade. Outros fenómenos, como a floculação da mistura, consequência da rápida hidratação das partículas de ligante de menor dimensão, também se apresentam como entraves na penetração do *grout* nestes espaços.

O fenómeno de absorção de água por parte dos poros do meio poroso deve-se essencialmente a dois fatores, nomeadamente a tensão superficial e o ângulo de contacto (entre a superfície de uma partícula do meio poroso e o líquido). Estes dois fenómenos serão futuramente abordados no presente trabalho.

De uma forma geral, e tendo em conta os fatores mencionados no presente capítulo, considera-se que uma injeção bem-sucedida é aquela que possui a capacidade de conseguir preencher um maior número de vazios, ou seja, que apresenta elevada injetabilidade, sendo capaz de restabelecer a coesão do núcleo do elemento e a continuidade entre panos, uniformizando as tensões e restabelecendo o comportamento monolítico original da alvenaria.

### 2.3. Comportamento do *grout* no estado endurecido

A eficiência da técnica de injeção de *grout* em paredes de alvenaria antiga não se encontra exclusivamente influenciada pelas propriedades do *grout* no seu estado fresco, mas também pelas suas propriedades no estado endurecido.

O *grout* ao ser injetado na alvenaria, após o seu endurecimento, irá encontrar-se sujeito aos mesmos esforços que o elemento, como sendo os esforços de flexão, compressão. Assim, considera-se importante ter uma percepção da capacidade resistente do *grout* no seu estado endurecido. Contudo, estudar as propriedades do *grout* juntamente com o meio poroso injetado adquire um grau de importância bastante superior (Telha, 2015).

Um aspeto importante no estudo do *grout* no seu estado endurecido é a sua estabilidade volumétrica, relacionada com a retração adquirida pelo *grout* após a sua cura. Este aspeto possui grande influência na durabilidade da intervenção, pois uma elevada retração irá provocar uma redução da adesão entre o *grout* e o meio poroso injetado (Bras, 2011; Jorne, 2016). Apesar de a retração autogénea do *grout* ser inevitável, valores reduzidos são necessários para que se estabeleça uma boa adesão entre o *grout* e o meio injetado (Mirza et al., 2013; Toumbakari et al., 2000). *Grouts* à base de cal hidráulica são fortemente influenciados pela temperatura na medida que a sua cura é obtida através do processo de hidratação da cal (Lothenbach et al., 2007). Este processo de hidratação traduz-se pela evaporação da água em excesso na mistura permitindo que a cal hidráulica adquira resistências mecânicas (Coutinho, 2006). Em função das condições ambiente a evaporação da água em excesso pode ocorrer mais ou menos repentina, podendo originar variações tanto na sua massa como no volume, configurando fenómenos de retração acentuados.

Posto isto, durante a campanha experimental da presente dissertação foram efetuados alguns ensaios ao *grout* no seu estado endurecido. Estes ensaios foram aplicados ao *grout* de uma forma isolada, com o objetivo de enriquecer o conhecimento relativo ao seu comportamento no seu estado endurecido.

## 2.4. Adjuvantes e adições

### 2.4.1. Superplastificante

As caldas de injeção (*grouts*) na sua generalidade são suspensões compostas pela mistura de um ligante com água. Estas simples misturas, de apenas dois componentes, nem sempre apresentam a melhor capacidade para a realização da técnica de injeção com o grau de satisfação requerido, sendo por vezes necessário recorrer a produtos adicionais - os adjuvantes.

Um dos adjuvantes mais utilizados na composição de *grouts* são os superplastificantes (SP). Segundo a NP EN 934-2 (NP 934-2, 2009) os superplastificantes possibilitam, sem alteração



da consistência, uma diminuição considerável da quantidade de água necessária na mistura de uma argamassa ou betão, possibilitando, ao mesmo tempo, um aumento da fluidez. O recurso a este tipo de adjuvante na conceção de um *grout* tem por base os seguintes objetivos:

- Promover a desfloculação, através do aumento da dispersão entre as partículas de ligante;
- Diminuir significativamente a quantidade de água livre na mistura.

Ao ser incrementada a dispersão entre as partículas de ligante proporciona-se um maior contacto direto entre estas e a água. Desta forma, potencia-se a absorção de água por parte das superfícies de ligante, que, consequentemente, possibilita a existência de uma menor quantidade de água livre na mistura. (Biçer-Simşir et al., 2009). A existência de uma menor quantidade de água livre na mistura proporciona uma melhoria considerável na capacidade de retenção de água do *grout*, dado que irá ocorrer uma menor absorção desta água por parte do meio poroso (Telha, 2015), otimizando as capacidades do *grout* no estado fresco.

Através da ação de desfloculação do *grout* torna-se possível a produção de um efeito retardador de presa. Este efeito deve-se à ação de forças de repulsão (Banfill, 2011). Trata-se, assim, de um agente de superfície ativo, que, do ponto de vista químico, atua sobre as partículas de ligante agregando sobre estas longas cadeias de polímeros, que por intermédio de cargas electrostáticas produzem repulsão (Martins & Bombard, 2011; Wallevik, 2009; Yamada et al., 2000). As cadeias de polímeros não só produzem efeito de repulsão electrostático como também um efeito denominado de impedimento esférico. Desta forma, e devido aos efeitos referidos, é promovido o afastamento entre partículas de *grout*, promovendo a desfloculação e um processo de hidratação retardado. Através da figura 2.8 pretende-se demonstrar de uma forma esquemática, a ação dispersante produzida pela adição de superplastificante na conceção de um *grout*..

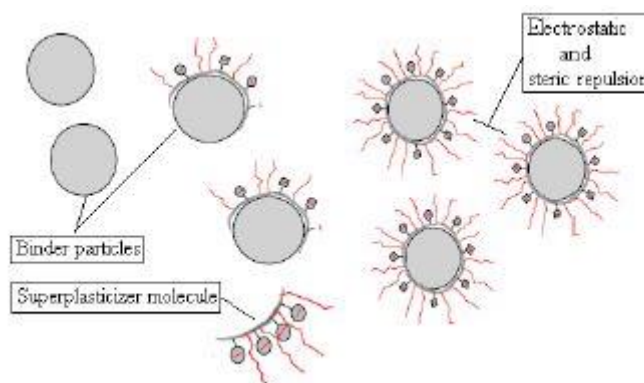


Figura 2.8: Efeito combinado das forças de repulsão electrostáticas e impedimento esférico (Baltazar, 2014)

Analisando os fenômenos supracitados, conferidos pela adição de superplastificante na conceção de um *grout* de injeção, torna-se possível esperar que ocorram melhorias significativas ao nível do comportamento reológico, nomeadamente dos parâmetros relativos à tensão de cedência e viscosidade plástica, sendo a diminuição destes parâmetros reológicos proporcionada pelo aumento de fluidez (Matos, 2013; Sakai et al., 2003).

Existem, no entanto, outras questões que se consideram de grande importância e impacto na eficácia da técnica de injeção, que são:

- A dosagem de superplastificante a ser considerada;
- A temperatura da mistura;
- Tempo de adição durante o processo de mistura.

Relativamente à dosagem, podem ser considerados dois tipos: a dosagem crítica (ou mínima) e a dosagem ótima (ou de saturação). Por dosagem crítica entende-se como sendo o mínimo necessário a adicionar para que ocorram melhorias ao nível da fluidez do *grout*. Já a dosagem ótima é entendida como sendo a quantidade a partir da qual já não são perceptíveis quaisquer ganhos adicionais (Roncero, 2000; Sakai et al., 2003; Vieira, 2010; Neno, 2016; Telha, 2015; Jorne, 2016). Apesar do incremento de fluidez do *grout* se tornar uma característica benéfica para a técnica de injeção, é necessário ter em consideração que um aumento progressivo da quantidade de superplastificante poderá produzir efeitos negativos. Quando esta quantidade for superior à considerada como ótima, poderá desenvolver-se a instabilidade da mistura e um aumento do índice de vazios após o endurecimento, que, por sua vez, afetará a qualidade da intervenção por diminuição da resistência mecânica final (Collepardi, 1998; Telha, 2015; Silva, 2016; Neno, 2016). Torna-se, assim, fundamental determinar qual deverá ser a dosagem ideal a adicionar à mistura, de forma a otimizar a formulação do *grout*.

Os superplastificantes, para além dos propósitos da sua utilização anteriormente mencionados, produzem um efeito retardador de presa que pode constituir-se como uma mais-valia para *grouts* sujeitos a temperaturas elevadas, visto atenuarem a sua tendência natural para acelerar o processo de hidratação. Ainda no que toca ao fator temperatura importa ressaltar que o desempenho deste adjuvante pode sofrer alterações consoante as condições ambiente às quais é sujeito. Para temperaturas elevadas resulta um aumento dos produtos de hidratação na superfície das partículas de ligante que irão envolver as camadas de superplastificante adsorvidas. Sendo as reações electrostáticas desenvolvidas a estas temperaturas mais fortes que as ações repulsivas do superplastificante (Baltazar, 2014), irá ocorrer um decréscimo da ação dispersante deste material.

Para temperaturas reduzidas, o decréscimo da agitação molecular e a formação de fortes pontes de hidrogénio devido à aproximação do ponto de congelamento da água, irão promover a diminuição do mecanismo dispersante devido a mudanças no arranjo espacial do superplastificante (Fernández-Altable & Casanova, 2006). De acordo com Yamada et al. (1999) a absorção de superplastificante a temperaturas reduzidas é inferior à absorção deste produto a temperaturas mais elevadas, contudo, em ambos os casos a quantidade absorvida pelas partículas de ligante vai aumentando com o passar do tempo. Desta forma, considera-se que a temperatura à qual é formulado um *grout* de injeção é um dos parâmetros essenciais a ter em conta durante o estudo das propriedades no estado fresco.

No que toca ao tempo de adição do superplastificante, segundo alguns autores (Baltazar et al., 2012b; Greisser, 2002; Hanehara, 1999; Hanehara 2006) considera-se ser um fator de grande influência no desempenho do *grout* no estado fresco e, futuramente, no seu estado endurecido. Segundo estes autores, a adição retardada deste adjuvante durante o processo de mistura, ou seja, adicionado a jusante da mistura inicial entre a água e o ligante, irá aumentar significativamente o seu efeito. A adição retardada tem como objetivo evitar que ocorra interação entre os produtos de hidratação iniciais que se formam durante a mistura entre a água e o ligante, possibilitando que durante as seguintes fases de hidratação o *grout* disponha de maior quantidade de superplastificante, de forma a potenciar os seus parâmetros reológicos (Baltazar et al., 2012b; Greisser, 2002; Hanehara, 1999; Hanehara 2006; Yamada, 2011).

#### 2.4.2. Silicone

O silicone é um dos materiais capazes de contribuir para a durabilidade e eficiência estrutural quando considerada uma ação de consolidação recorrendo à injeção de *grout* no núcleo de paredes de alvenaria. Trata-se de um material com propriedades hidrofóbicas, que quando adicionado diretamente na mistura do *grout* possui a capacidade de aumentar de forma considerável a capacidade de retenção de água da suspensão. Ao potenciar a capacidade de retenção de água de constituição, são introduzidas melhorias ao nível da fluidez e injetabilidade, e como resultado, serão obtidos melhores parâmetros resistentes após a fase de endurecimento (Telha, 2015).

A necessidade de introdução deste material não se encontra apenas relacionado com melhorias introduzidas aos *grouts* de injeção, mas também com as características do meio poroso a injetar, nomeadamente a sua capacidade de absorção de água. Ao ser adicionado silicone é promovido um aumento do ângulo de contacto entre a superfície do material e o *grout*, o que

implica uma redução da molhabilidade da superfície do meio poroso fazendo com que o *grout* perca menos água para as partículas do meio poroso (Silva, 2016).

Estudos anteriores foram realizados para aferir a influência da introdução de silicone na otimização do ângulo de contacto, em parâmetros como a fluidez e capacidade de retenção de água da calda, e em parâmetros resistentes após aplicada a técnica de injeção (Telha, 2015; Silva, 2016; Neno, 2016). Nestes estudos, o silicone foi introduzido no meio poroso por meio de uma pré-injeção ou por adição direta no processo de amassadura do *grout*. Apenas para a pré-injeção foram estudadas diferentes concentrações de uma solução de água e silicone. Segundo Telha (2015) a introdução deste material permitiu, quando pré-injetado, obter melhores injetabilidades comparativamente a injeções sem silicone, em proporção direta com o incremento da concentração da solução de silicone. Este autor concluiu que este facto se deve ao maior grau de fluidez obtido pelo *grout* quando reduzida a absorção de água por parte do meio poroso. Esta redução proporcionou uma penetrabilidade superior mesmo em meios porosos com granulometrias mais finas e com grande capacidade de absorção de água (tijolo cerâmico).

O incremento da concentração de silicone, apesar de promover o incremento do ângulo de contacto, pode no entanto produzir alguns efeitos negativos, nomeadamente:

- Aumento da viscosidade da calda, e consequente perda de fluidez
- Redução da ligação *grout* – meio poroso

Através de um ensaio de injeção com o recurso a um modelo reduzido cilíndrico, preenchido com um meio poroso, o qual pretendia simular o interior de uma parede alvenaria, Neno (2016) chegou à conclusão que um de *grout* com silicone na sua composição, com um traço 1:6 (silicone/água), possui uma viscosidade superior à de um *grout* sem esta adição, quando usado em ambas a mesma quantidade de superplastificante. Segundo este autor, quando considerada a aplicação de silicone como adjuvante na mistura de *grout*, esta adição deverá ser compensada com o incremento da percentagem de superplastificante na mistura.

Com a adição de silicone, diretamente na mistura de *grout* ou pré-injetado no meio poroso, torna-se possível ocorrer uma redução da ligação entre o *grout* e as partículas do meio poroso, uma vez que ocorre a redução da molhabilidade da superfície das partículas. Este efeito pode ter consequências no estado endurecido, ao nível das resistências mecânicas adquiridas após a cura do *grout* no interior do meio injetado. Todavia, nos estudos anteriormente mencionados conduzidos por Telha (2015) e Silva (2016) foram realizadas injeções de *grout* em provetes

cilíndricos com material granulométrico (cerâmico e calcário), de forma a simular a injeção no núcleo de uma parede de alvenaria. Após o seu endurecimento, foram conduzidos ensaios no estado endurecido com o intuito de aferir as suas resistências mecânicas. Através destes ensaios, chegou-se à conclusão que os provetes que apresentavam injeções efetuadas com maiores concentrações em silicone pré-injetado possuíam maiores valores de resistência ao corte, e que esta questão não residia na qualidade da ligação *grout*/meio poroso, mas sim, no maior volume de *grout* injetado, resultante do menor efeito de absorção de água do meio poroso. Desta forma, a superior injetabilidade obtida pelo aumento da concentração de silicone, assume um papel importante, sobrepondo-se à ligação *grout*/meio poroso (Silva, 2016). Contudo, e devido à redução da qualidade da ligação, os valores obtidos em ensaios de resistência à compressão e flexão foram mais reduzidos.

Este hidrófugo de superfície, do tipo polidimetilsiloxano foi adotado dada a sua compatibilidade com a grande maioria dos materiais de construção e também devido à particularidade de ser solúvel em água (Henkel, 2011). Este polímero pertence à família dos radicais metil, com características anfipáticas, possuindo uma parte polar (parte mineral: Si-O) e outra não-polar (parte orgânica: CH<sub>3</sub>). Ao serem aplicados na superfície de outros materiais, que na sua maioria possuem hidróxido de cálcio, a parte polar é atraída, orientando para o exterior a parte não-polar. Devido a este efeito (figura 2.9) as superfícies assumem um comportamento hidrófobo, reduzindo a molhabilidade da superfície.

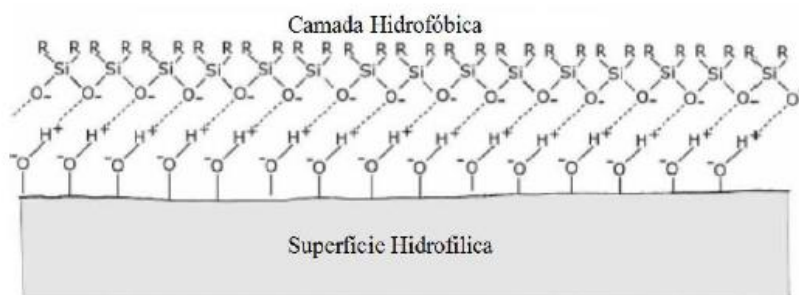


Figura 2.9: Alteração química produzida numa superfície polar devido à aplicação de silicone (Torraca, 2009)

#### 2.4.2.1. Molhabilidade e ângulo de contacto

O ângulo de contacto ( $\theta$ ) é um parâmetro que permite avaliar a afinidade existente entre uma superfície e um fluido quando ambos se encontram em contacto. Através do valor do ângulo de contacto a superfície pode ser caracterizada pela sua maior ou menor molhabilidade (Bracco & Holst, 2013). Assim, a molhabilidade pode ser considerada como a capacidade que um líquido possui de molhar uma superfície.

Segundo Henriques (2011), o ângulo de contacto traduz-se pela “inclinação da tangente a uma gota do líquido sobre a superfície em causa” como ilustrado na figura 2.10. Segundo este autor, a superfície pode ser considerada como tendo um comportamento hidrófilo quando  $\theta < 90^\circ$ , apresentando grande afinidade com o líquido; e um comportamento hidrófobo quando  $\theta > 90^\circ$ , onde a afinidade entre o líquido e a superfície é bastante reduzida.



Figura 2.10: Diferentes ângulos de contacto formados entre uma gota de um líquido e superfície de um sólido (Telha, 2015)

Os materiais de construções possuem na sua generalidade uma grande afinidade com água. Quimicamente, as superfícies dos materiais de construção apresentam propriedades polares, apresentando em contacto com uma gota de água um ângulo de contacto nulo ( $\theta = 0$ ). A polaridade da superfície pode no entanto ser alterada através da aplicação de um hidrófugo de superfície (Henriques, 2011) como sendo o caso do silicone, conferindo um comportamento repelente (hidrófoba). Quanto mais eficaz o hidrófugo aplicado, maior será o valor do ângulo de contacto entre a gota e a superfície.

#### 2.4.2.2. Efeito de sucção capilar

No contexto de injeções de *grout* em meios porosos, o *grout* é considerado como um fluido molhante, ou seja, apresenta um ângulo de contacto inferior a  $90^\circ$  ( $\theta < 90^\circ$ ). O *grout* ao entrar em contacto pelo meio poroso terá a tendência para ser absorvido, em particular a sua componente líquida, através de um conjunto de forças de sucção ou pressões capilares negativas (Telha, 2015). A sucção capilar pode ser interpretada pela equação de Young-Laplace apresentada seguidamente.

$$S = \frac{4\sigma \cos \theta}{D}$$

Em  $S$  representa a sucção capilar,  $\theta$  o ângulo de contacto entre a superfície e o líquido,  $D$  o diâmetro de um poro e  $\sigma$  a tensão superficial do fluido.

Através da observação da equação de Young-Laplace é possível concluir que a sucção capilar vai ser tanto maior quanto mais baixo for o valor do ângulo de contacto e a dimensão dos poros do meio. Os poros de menor dimensão serão precisamente aqueles que irão provocar o efeito de sucção capilar da componente líquida do *grout* (água), fazendo com que este perca fluidez, originando uma diminuição da capacidade de penetração e consequentemente uma injetabilidade mais reduzida. Logo, considera-se que ao ser alterado o ângulo de contacto estará a promover-se uma redução da sucção capilar. Através da figura 2.11, torna-se possível perceber a influência do ângulo de contacto na absorção capilar.

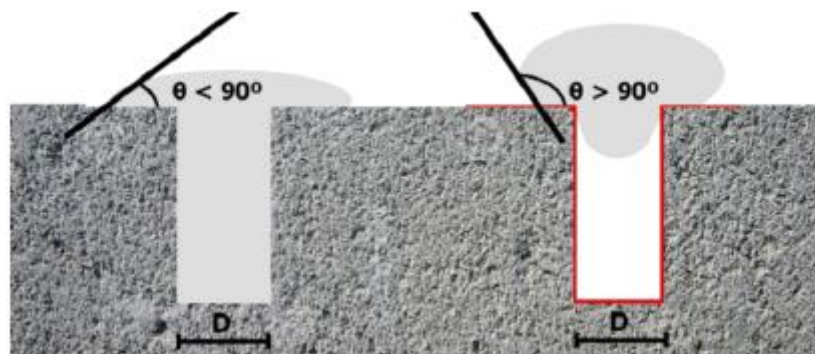


Figura 2.11: Efeito da alteração do ângulo de contacto sobre o comportamento do *grout* (Groen et al., 2003)

Por observação da figura 2.11, é possível concluir que a alteração do valor do ângulo de contacto irá proporcionar uma maior dificuldade de penetração nos poros de menores dimensões. Esta redução da absorção capilar pode ser conferida pela aplicação de um hidrófugo. Desta forma, o *grout* será capaz de conservar a água de constituição durante mais tempo, conservando as suas propriedades reológicas por um período de tempo superior, resultando numa injeção mais eficaz.





### 3. CAMPANHA EXPERIMENTAL

#### 3.1. Composição do *grout*

Como mencionado no capítulo anterior do presente trabalho, o estudo da composição do *grout* é de extrema importância. Este deverá compreender a escolha criteriosa dos materiais a usar na sua composição, como também, uma análise minuciosa das suas características, de forma a tornar-se possível conceber o *grout* que apresente não só as melhores propriedades para a realização de uma injeção bem-sucedida, como também a melhor compatibilidade com o suporte onde será aplicada a técnica de consolidação.

A campanha experimental desenvolvida no presente trabalho teve como objetivo o estudo do *grout* no seu estado fresco. Para a realização deste estudo foram concebidas diversas suspensões, apresentando diferentes composições ao nível das dosagens de adjuvantes (superplastificante e silicone líquido) e diferentes temperaturas de amassadura. Na tabela 3.1 apresentam-se os ensaios realizados durante a campanha desenvolvida.

Tabela 3.1: Ensaios realizados para caracterização do *grout*

ESTUDO DO <i>GROUT</i>	
<b>Ensaios no estado Fresco</b>	Cone de Marsh
	Espalhamento
	Retenção de Água
	Estabilidade
	Injeção em coluna Francesa
<b>Ensaios no estado Endurecido</b>	Resistência à Flexão
	Resistência à Compressão
	Ensaio de Porosidade Aberta
	Ensaio de retração

Salienta-se ainda o facto de que toda a campanha experimental foi realizada nas instalações do departamento de engenharia civil (DEC) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, em parceria com José Barros, com quem se desenvolveu conjuntamente o trabalho laboratorial.

### 3.1.1. Materiais utilizados na composição do *grout*

Para a realização da campanha experimental da presente dissertação, recorreu-se a um ligante à base de cal hidráulica com a denominação HL5, produzida pela SECIL – Martingança (figura 3.1) de acordo com a norma NP EN 459-1:2001 (IPQ, 2011).



Figura 3.1: Cal hidráulica HL5 utilizada na formulação dos diferentes *grouts*

Entre os diversos tipos de ligantes existentes no mercado, a escolha deste tipo de ligante baseia-se na sua compatibilidade não apenas física e química, como também mecânica, com os materiais presentes em paredes de alvenaria antiga (Jorne et al, 2012a; Jorne et al., 2012b). As tabelas que se seguem apresentam as propriedades físicas e químicas da cal hidráulica HL5, de acordo com os dados fornecidos pelo próprio fabricante.

Tabela 3.2: Características da cal hidráulica HL5

CARACTERÍSTICAS DA CAL HL5		
<b><i>Resistência Mecânica à Compressão</i></b>	7 dias	$\geq 2,0$ MPa
	28 dias	$>5,0$ MPa e $< 15,0$ MPa
<b><i>Finura</i></b>	90 $\mu$	$\leq 15,0\%$
	200 $\mu$	$\leq 2,0\%$
<b><i>Tempo de Presa</i></b>	Inicial	$>1$ h
	Final	$\leq 15$ h
<b><i>Expansibilidade</i></b>	$\leq 2,0$ mm	
<b><i>Cal Livre</i></b>	0,0389	

Tabela 3.3: Densidade e finura da cal HL5 usando o permeâmetro Blaine (Jorne, 2016)

PROPRIEDADES ADICIONAIS DA CAL HL5	
<i>Densidade</i>	2,7
<i>Finura de Blaine</i>	9400 cm <sup>2</sup> /g

Tabela 3.4: Caracterização química da cal HL5 de acordo com os resultados XRF (Jorne, 2016)

CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DA CAL HL5	
Designação do composto	Quantidade (%)
<i>MgO</i>	0.99
<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	2.96
<i>SiO<sub>2</sub></i>	10.86
<i>SO<sub>3</sub></i>	197
<i>K<sub>2</sub>O</i>	0.89
<i>CaO</i>	78.97
<i>TiO<sub>2</sub></i>	0.3
<i>MnO</i>	0.04
<i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	2.96
<i>SrO</i>	0.06
<i>Na<sub>2</sub>O</i>	0.26

Com o objetivo de apresentar uma caracterização mais aprofundada das propriedades do ligante utilizado, na figura 3.2 apresenta-se a distribuição granulométrica da cal hidráulica HL5 utilizada em toda a campanha experimental do presente trabalho.

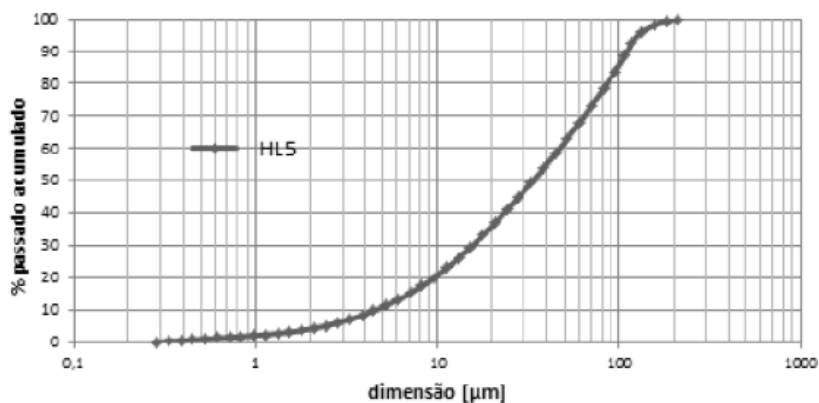


Figura 3.2: Distribuição da granulometria da cal HL5 (Jorne, 2016)

Conforme mencionado anteriormente no capítulo referente ao estudo do conhecimento, os *grouts* são por definição suspensões obtidas pela simples mistura entre água e ligante. De acordo com alguns autores (Baltazar et al, 2015; Fernández & Casanova, 2006) estas simples suspensões não apresentam por si só as melhores características para que sejam atingidos os objetivos pretendidos para este tipo de intervenção, em particular, uma injeção bem-sucedida e consolidação da alvenaria alvo de intervenção. Estes autores afirmam que as propriedades do *grout*, nomeadamente no seu estado fresco, podem ser melhoradas com adição de adjuvantes na sua composição.

Durante a campanha experimental do presente trabalho, e numa tentativa de melhorar as propriedades do *grout* no estado fresco, optou-se pela adição de adjuvantes diretamente no processo de mistura dos *grouts*, em particular superplastificante e silicone líquido. Foram assim concebidas diferentes tipos de misturas com o intuito de avaliar a influência destes componentes nas propriedades do estado fresco deste material.

O superplastificante de terceira geração adotado é concebido à base de Policarboxilato, produzido pela BASF (MASTER GLENYUM SKY 617), apresentando as propriedades descritas na tabela seguinte de acordo com o fabricante.

Tabela 3.5: Características do superplastificante (BASF, 2014)

<b>CARACTERÍSTICAS DO SUPERPLASTIFICANTE</b>	
<b><i>Designação Comercial</i></b>	Glenium Sky 617 (BASF)
<b><i>Estrutura do Material</i></b>	Policarboxiato (Líquido)
<b><i>Massa volúmica (20°C)</i></b>	1,041 g/cm <sup>3</sup> ± 0.02 g/cm <sup>3</sup>
<b><i>pH</i></b>	6 ± 1
<b><i>Teor de Iões Cloreto</i></b>	<0,10 %
<b><i>Carga</i></b>	Aniónica
<b><i>Cor</i></b>	Castanho
<b><i>Função</i></b>	Promover a fluidez do <i>grout</i> ; Reduzir a dosagem de água do <i>grout</i> ; Evitar a floculação do <i>grout</i> .

Este material possui a capacidade de aumentar a fluidez do *grout*, sem que seja alterada a relação água/ligante, através da repulsão electrostática entre as partículas de ligante, melhorando assim a sua fluidez e retardando o fenómeno de floculação por hidratação do ligante (Guerreiro,

2014; Roussel et al., 2010; Vikan, 2005). Assim, com a adição deste material são melhoradas as propriedades reológicas do *grout*, diminuindo a viscosidade plástica e a tensão de cedência (Baltazar et al., 2012b). Este material deve ser adicionado em percentagens inferiores a 5% da massa de ligante utilizado na amassadura (NP 934-2, 2009).

Na formulação dos *grouts* em estudo, da mesma forma que outros autores (Miguel, 2017; Neno, 2016; Silva, 2016) foi considerada a adição de uma solução de silicone líquido diretamente na amassadura do *grout*. Neste sentido, e no seguimento de estudos desenvolvidos pelos autores mencionados, pretende-se promover a alteração do ângulo de contacto entre o *grout* e o meio poroso, com o objetivo de reduzir a perda de água da sua constituição. Com esta adição pretende-se obter injeções com uma maior taxa de sucesso, melhorando a capacidade de percolação da calda através dos vazios entre as partículas do meio poroso.

Para a solução de silicone a adicionar no processo de mistura, foi adotado silicone líquido da marca Rubson, com denominação SL3000, encontrando-se este material como produto certificado para impermeabilização de acordo com a “Aprovação Técnica Europeia” ETAG 005. Na pela tabela 3.6 encontram-se apresentadas as características deste produto de acordo com o fabricante.

Tabela 3.6: Características do silicone SL3000 conforme indicado na ficha técnica do fabricante (Henkel, 2011)

<b>CARACTERISTICAS DO SILICONE</b>	
<b><i>Designação Comercial</i></b>	Silicone Líquido SL3000 (Rubson)
<b><i>Base</i></b>	Silicone
<b><i>Massa Volúmica (20°C)</i></b>	Aproximadamente 1,3g/ml
<b><i>Temperatura de Aplicação</i></b>	Entre 10°C e 30°C
<b><i>Tempo de Secagem</i></b>	2mm cada 24horas
<b><i>Resistência à chuva</i></b>	Após 3 - 7 horas
<b><i>Cor</i></b>	Branca
<b><i>Aspecto</i></b>	Líquido Pastoso
<b><i>Propriedades Adicionais</i></b>	Solúvel em água; Até 400% de elasticidade; Grande resistência aos raios UV; Grande capacidade de enchimento; Mantem a flexibilidade a baixas temperaturas; 100% estanque; Permeável ao vapor de água; Resiste a temperaturas extremas (-20oC a 80oC); Resiste a ataques pontuais de ácidos e bases diluídas.

De acordo com os estudos desenvolvidos por Neno (2016) e Silva (2016), a adição do silicone de forma direta no processo de amassadura do *grout* pode ser prejudicial, podendo afetar negativamente o seu desempenho no estado fresco. Na tentativa de reproduzir as características

do “*grout* comum” (*grout* com 1,2% superplastificante) através da adição de silicone, estes autores recorreram à adição de uma solução com traço volumétrico de 1:6 (silicone/água), tendo chegado à conclusão que para este traço, a adição de superplastificante com percentagens entre 1,6% e 2,0%, não produz qualquer entrave a nível da estabilidade e capacidade de retenção de água do *grout*. Segundo estes estudos, o *grout* que apresentou as características mais próximas do *grout* comum foi concebido com 2% de superplastificante e traço 1:6 de silicone para uma temperatura de amassadura de 20°C.

Na figura 3.3, são apresentados os dois tipos de adjuvantes utilizados para a formulação dos *grouts* estudados durante a campanha experimental no presente trabalho.



Figura 3.3: Adjuvantes utilizados para a formulação dos *grouts*: superplastificante (esq.) e silicone (dir.)

### 3.1.2. Procedimento de mistura

No âmbito da campanha experimental desenvolvida, na qual se procedeu ao estudo do *grout* no seu estado fresco para diferentes condições ambiente, nomeadamente diferentes temperaturas, a água utilizada na amassadura foi sujeita a diferentes temperaturas previamente ao processo de mistura.

O processo de mistura utilizado foi desenvolvido anteriormente por diversos autores (Neno, 2016; Baltazar et al., 2015; Baltazar et al., 2013; Jorne et al., 2012) sendo desenvolvido em três fases. Na primeira fase é adicionada a totalidade da massa de ligante em 70% da totalidade de água de amassadura, misturando-se manualmente numa fase inicial, e seguidamente de forma mecânica durante 10 minutos a uma velocidade de aproximadamente 2400 rpm (figura 3.4). Na segunda fase do processo é introduzido uma solução de superplastificante com 10% da água de

amassadura, sem interromper a misturadora, procedendo-se à mistura durante aproximadamente 2 minutos até que o *grout* apresente um aspeto relativamente homogéneo. O atraso de 10 minutos na incorporação do superplastificante na amassadura, conforme mencionado no capítulo referente ao estudo do conhecimento, promove de forma mais eficaz a dispersão das partículas do que quando adicionado inicialmente na primeira fase da mistura (Baltazar et al., 2012b; Greisser, 2002; Hanehara, 1999; Yamada, 2011).



Figura 3.4: Hélice utilizada para mistura do *grout* (esq.) e mistura do *grout* (dir.)

Numa terceira e última fase, é introduzida a solução de silicone preparada previamente com a totalidade da massa deste material diluído nos restantes 20% da água de amassadura. Após concluída a introdução de todos os materiais constituintes do *grout*, o processo de mistura foi mantido durante mais 2 minutos, com o objetivo de se obter uma suspensão final o mais homogénea possível.

A figura 3.5 pretende clarificar todas as fases do processo de mistura do *grout* e qual a morfologia do *grout* após cada uma das fases.

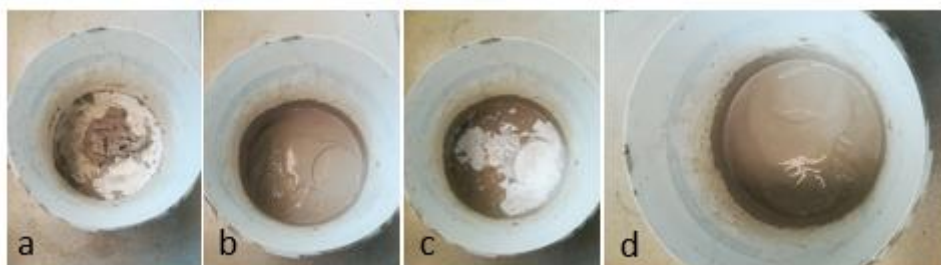


Figura 3.5: Fases do processo de mistura (da direita para a esquerda): a) mistura de 100% ligante com 70% de água; b) adição de superplastificante; c) adição de silicone; d) produto final

### 3.1.3. Formulação dos *grouts* a analisar

Considera-se necessário conduzir estudos relativamente à adição de silicone na mistura do *grout* de forma a enriquecer o conhecimento sobre esta matéria. Assim, durante a campanha experimental da presente dissertação, foram concebidas novas formulações de *grout*, através da adição de diferentes traços de solução de silicone/água mantendo-se constante uma percentagem de 2% de superplastificante idealizada por Neno (2016) para este tipo de mistura (*grout* com silicone).

Na conceção dos diferentes *grouts* analisados foi mantida constante a relação água/ligante de 0,50 ( $w/b = 0,50$ ), que de acordo com estudos já realizados (Jorne et al., 2012a; Baltazar & Henriques 2015), corresponde ao valor que apresenta melhor comportamento a nível de injetabilidade.

Com o objetivo de tornar mais amplo o conhecimento sobre o comportamento no estado fresco de *grouts* à base de cal hidráulica com silicone na sua constituição, os *grouts* concebidos durante a campanha experimental foram sujeitos a diferentes temperaturas durante o processo de mistura e diferentes tempos de repouso, de acordo com estudos anteriores (Neno, 2016; Brás et al., 2010; Guerreiro, 2014; Baltazar, 2014; Jorne, 2016). Pretende-se assim proceder a uma avaliação do efeito combinado entre a temperatura, o tempo de repouso e diferentes dosagens de hidrófugo (silicone) no comportamento do *grout* no seu estado fresco. Na tabela 3.7 são apresentadas as nove composições distintas analisadas nesta dissertação.

Tabela 3.7: Diferentes *grouts* formalizados para estudo

Temperatura da água	HL5 (%)	w/b	Superplastificante	Traço de Silicone (s:a)
5°C	100	0,50	2%	1:2
				1:4
				1:6
20°C	100	0,50	2%	1:2
				1:4
				1:6
40°C	100	0,50	2%	1:2
				1:4
				1:6



Todas as nove composições foram sujeitas a ensaios experimentais no seu estado fresco, de forma a ser possível compreender o comportamento das diferentes suspensões, tendo seguidamente sido realizado o estudo em termos de injetabilidade. Posteriormente, realizaram-se ensaios no estado endurecido com o objetivo de enriquecer o conhecimento relativo ao comportamento das caldas após de concluído o seu processo de hidratação.

### 3.2. Ensaios realizados no estado fresco

#### 3.2.1. Ensaio de Cone de Marsh

De acordo com a norma ASTM C939-02 (“*Flow Test Cone*” em inglês) (ASTM, 2002), a medição do tempo de escoamento com recurso a um cone com dimensões normalizadas permite obter conclusões relativas à fluidez do *grout*, e por conseguinte da sua viscosidade, apesar de uma forma mais expedita. O facto de o *grout* apresentar um tempo de escoamento mais elevado traduz-se pela sua menor fluidez sendo um indicador de uma maior viscosidade e vice-versa (Neno, 2016).

A medição do tempo de escoamento com recurso ao cone de Marsh, segundo alguns autores (Assad & Daou, 2014; Baltazar et al., 2014; Jorne, 2016; Le Roy & Roussel, 2004), apresenta-se como sendo um método adequado e prático para análise da fluidez do *grout*. Contudo, dadas as dimensões do cone, em particular o orifício de saída com 12,5 mm de diâmetro, pode conduzir a erros bastante significativos (Jorne, 2016), podendo este erro ser 10 vezes superior ao alcançado com um cone de Marsh modificado, como verificado por alguns autores (Le Roy & Roussel, 2004).

Na presente campanha experimental, e à semelhança do indicado por Jorne (Jorne, 2016), utilizou-se um cone de Marsh modificado com um orifício de saída de 6 mm de diâmetro, medindo-se o tempo de escoamento através de um fluxo de 800 cm<sup>3</sup> ( $Q = 800 \text{ cm}^3$ ). A totalidade dos ensaios foram realizados às condições ambientes presentes em laboratório nomeadamente temperaturas na ordem dos  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  e a humidade relativa de cerca de  $60 \pm 5\%$ . A figura 3.6 pretende ilustrar o esquema de ensaio relativo ao cone de Marsh modificado.

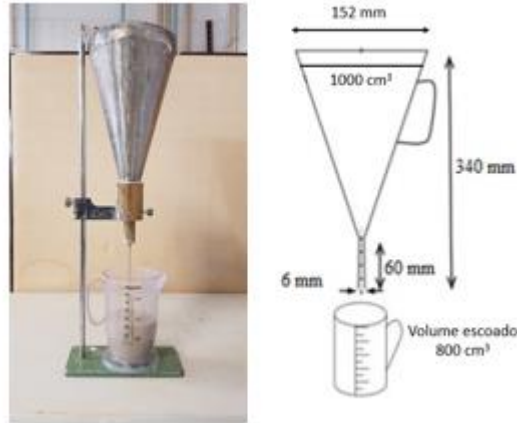


Figura 3.6: Esquema de ensaio de cone de Marsh

Em convergência com os ensaios realizados por outros autores (Jorne, 2016) foi determinado o fator de fluidez através da equação seguinte, para um fluxo de 800 cm<sup>3</sup>:

$$Fl = \frac{Q}{A \times tf}$$

onde,  $Fl$  representa o factor de fluidez (mm/s),  $Q$  representa o fluxo de *grout* fixado em 800 cm<sup>3</sup>,  $A$  representa a área da secção transversal do orifício de saída do cone (mm<sup>2</sup>) e  $tf$  representa o tempo de escoamento do *grout* (s).

Tomando em consideração a equação anterior, é possível verificar que *grouts* que apresentem uma maior fluidez conduzem a tempos de escoamento mais rápidos, isto é, potenciam velocidades de fluxo mais elevadas. Segundo Miltiadou-Fezans e Tassios (Miltiadou-Fezans & Tassios, 2012) a fluidez do *grout* é avaliada em função do factor de fluidez obtido através desta equação.

Considera-se importante referir que este tipo de ensaio possui um carácter expedito, não apresentando um rigor elevado. De forma a minimizar alguns erros de operação, os ensaios foram sempre realizados através da introdução no cone de Marsh de um volume de *grout* de aproximadamente 1000 cm<sup>3</sup>, no qual se mediu o tempo de escoamento de apenas 800 cm<sup>3</sup>. Com esta prática pretende-se eliminar possíveis erros introduzidos pela turbulência que ocorre junto ao orifício de saída do cone, podendo conduzir a erros de medição no tempo de escoamento, dado o incremento da velocidade nesta secção do cone. Igualmente no sentido de minimização dos erros de operação, foram realizados dois ensaios para cada uma das diferentes misturas de *grout*, ou seja, para um dado tempo de repouso o *grout* foi ensaiado duas vezes, sendo os valores apresentados resultantes da média dos dois ensaios. Relativamente aos *grouts* formulados a

temperaturas extremas (5°C e 40°C), de forma a que a temperatura do *grout* se mantivesse praticamente constante durante a realização do ensaio, procedeu-se à colocação prévia do cone em equipamentos capazes de conferir estas temperaturas, nomeadamente uma estufa aquecida a 40°C e um frigorífico com temperatura de aproximadamente 6°C.

### 3.2.2. Ensaio de espalhamento

Outro ensaio utilizado para avaliar a fluidez do *grout* é o ensaio de espalhamento (“*mini slump-test*” em inglês). Este ensaio foi realizado de acordo com a norma NP 445:2008 (NP EN 445:2008).

Este ensaio baseia-se na medição do diâmetro atingido pelo *grout* quando disperso um dado volume sobre uma placa horizontal graduada. O ensaio consiste na colocação de um molde cilíndrico de dimensões definidas (39mm de diâmetro e 60mm de altura) no centro da placa, onde por sua vez será vertido o *grout* para o seu interior sem excesso e de forma cuidadosa. Posteriormente, e de maneira a eliminar eventuais bolhas de ar no interior do molde, este é levemente pressionado e de seguida levantado lentamente. De seguida, e após cessado o espalhamento do *grout*, é medido o diâmetro alcançado sobre a placa graduada. A figura 3.7 obtida da norma referida pretende representar um modelo ilustrativo do esquema de ensaio.

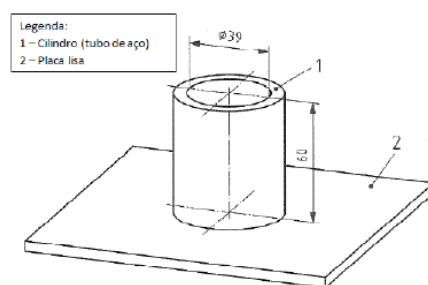


Figura 3.7: Esquema de ensaio de espalhamento (cilindro e placa graduada) (NP EN 445, 2008)

De forma a melhorar a exatidão dos resultados, ao contrário da norma NP 445:2008 (NP EN 445, 2008), foram introduzidos por outros autores mais dois diâmetros (Neno, 2016; Telha, 2015), tornando possível realizar medições em quatro direções distintas. O valor final do espalhamento será obtido pela média dos diâmetros medidos nas diferentes direções de acordo com a seguinte equação:

$$E \text{ médio} = \frac{d1 + d2 + d3 + d4}{4}$$

em que  $E_{\text{médio}}$  representa o diâmetro de espalhamento médio (cm) e  $d1$ ,  $d2$ ,  $d3$ , e  $d4$  representam os diâmetros medidos nas diferentes direções (cm). De igual forma ao descrito para o procedimento do ensaio de cone de Marsh, os valores obtidos para os diâmetros de espalhamento resultam da média de dois ensaios realizados para cada uma das misturas nos três tempos de repouso analisados. Na figura 3.8 pode ser observado o procedimento de ensaio descrito anteriormente.



Figura 3.8: Realização do ensaio de espalhamento (esq.) e resultado do ensaio (dir.)

Segundo Domone (Domone, 1998), a forma do diâmetro de espalhamento, encontra-se relacionada com a tensão de cedência, dado que o espalhamento da amostra termina quando as tensões de corte se tornam inferiores às tensões de cedência plástica. Assim, a avaliação do diâmetro médio de espalhamento afigura-se como importante para a análise de algumas propriedades intrínsecas do *grout* no seu estado fresco, permitindo avaliar a fluidez do *grout* e estimar a sua tensão de cedência (Neno, 2016).

### 3.2.3. Ensaio de estabilidade

Tendo em vista a realização de uma injeção bem-sucedida é fundamental efetuar um controlo adequado das propriedades associadas ao comportamento reológico do *grout* no estado fresco. Como mencionado anteriormente, uma das propriedades a ter em conta é a estabilidade.

Com o objetivo de estudar a estabilidade das diferentes misturas de *grout* concebidas recorreu-se ao procedimento desenvolvido por Van Rickstal (2000), o qual consiste na medição da variação da massa volúmica nas camadas superiores da calda quando esta se encontra em repouso num recipiente.

De acordo com o procedimento de ensaio é necessária a colocação de 500 ml de *grout* num recipiente graduado e uma esfera de aço inox, com massa de 34,29 g e um volume 4,85 cm<sup>3</sup>, suspensa na base de uma balança a partir da posição de equilíbrio. Em seguida, a esfera deverá ser introduzida na camada superior do *grout* imersa a  $\frac{3}{4}$  do seu volume e centrada relativamente ao recipiente de ensaio. Importa referir que a balança utilizada possui a capacidade de registar a massa de objetos suspensos na sua base. Assim, a esfera ao encontrar-se a flutuar na camada superior do *grout*, o valor registado pela balança é uma força ascendente (força de impulsão - Lei de Arquimedes) exercida pela calda. O *grout* ao encontrar-se em repouso dentro do recipiente irá proporcionar a deposição das partículas sólidas da suspensão, alterando a massa volúmica do *grout*, e consequentemente os valores da força de impulsão registados na balança. Este fenómeno é passível de ocorrer devido a fenómenos associados à estabilidade do *grout*, como são os casos da segregação e exsudação, capazes de conferir heterogeneidade à suspensão. À semelhança do realizado em trabalhos anteriores (Telha, 2015; Neno, 2016; Baltazar, 2014; Jorne, 2016), e na tentativa de avaliar a estabilidade dos diferentes *grouts*, são registadas periodicamente (de 5 em 5 minutos) as variações da força de impulsão exercidas pelo *grout* durante 70 minutos.

A análise da estabilidade dos diferentes *grouts* foi efetuada com base tanto nas suas percentagens de massa volúmica inicial como nos sucessivos valores desta, registados no decurso do ensaio, de acordo com a seguinte equação:

$$Estabilidade = \frac{\rho}{\rho_i} \times 100$$

em que  $\rho$  representa a massa volúmica do *grout* em cada registo (Kg/m<sup>3</sup>) e  $\rho_i$  representa a massa volúmica apresentada pelo *grout* no início do ensaio (Kg/m<sup>3</sup>).

O ensaio anteriormente descrito foi efetuado às condições ambiente presentes em laboratório, nomeadamente  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  de temperatura e  $60 \pm 5\%$  de humidade relativa, seguindo o esquema apresentado na figura 3.9.

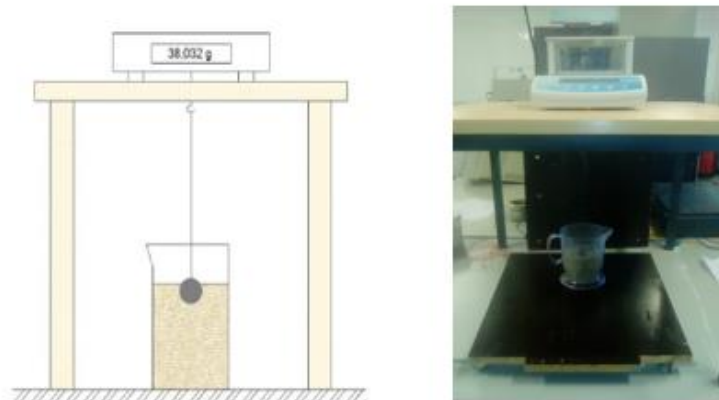


Figura 3.9: Esquema representativo do ensaio de estabilidade (Baltazar, 2014)

#### 3.2.4. Ensaio de retenção de água

De modo a aferir a capacidade de retenção de água dos *grouts* concebidos recorreu-se ao ensaio descrito na norma ASTM C941-02 (ASTM, 2002). Segundo este procedimento é determinado o tempo necessário para a remoção de uma dada quantidade de água de uma amostra de *grout*.

A partir da aplicação de uma depressão controlada através de um manómetro de  $5,0 \pm 0,2$  KPa, a um funil de Büchner com aproximadamente 500 ml, procede-se á tentativa de remoção da água da amostra para uma proveta graduada.

Previamente à realização do ensaio foram tomadas algumas medidas de forma a melhorar a precisão dos resultados como também facilitar a leitura da quantidade de água removida:

- Colocação de um filtro previamente humedecido na base do funil de Büchner impedindo a obstrução do mesmo;
- Humedecimento de todo o sistema de ensaio;
- Recolha da água utilizada para humedecimento do filtro e do sistema para a proveta graduada, até um volume de 100 ml, facilitando a posterior leitura da água recolhida da amostra durante o decorrer do ensaio;
- Pré-arrefecimento e pré-aquecimento do funil de Büchner às mesmas temperaturas de amassadura dos *grouts* em estudo (5°C, 20°C, e 40°C).

De acordo com a norma de ensaio, o procedimento deverá ser realizado até que sejam retirados 60 ml de água da amostra. Devido à adição de silicone líquido na concepção das amostras de *grout*, para o presente ensaio, é esperado que esta adição conduza a valores de retenção de água relativamente superiores aos registados por outros autores (Neno, 2016; Telha, 2015; Jorne, 2016; Baltazar, 2014). Desta forma, e dada a possível dificuldade de remoção de água apresentada pelas amostras, o ensaio foi realizado para um período máximo de 2 horas, ao fim do qual se registou o volume de água apresentado na proveta graduada.

Os ensaios referentes à aferição da capacidade de retenção de água dos diversos *grouts* foram efetuados sob as condições ambiente presentes em laboratório, nomeadamente uma temperatura de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  e humidade relativa de  $60 \pm 5\%$ , de acordo com o esquema de ensaio apresentado na figura 3.10.

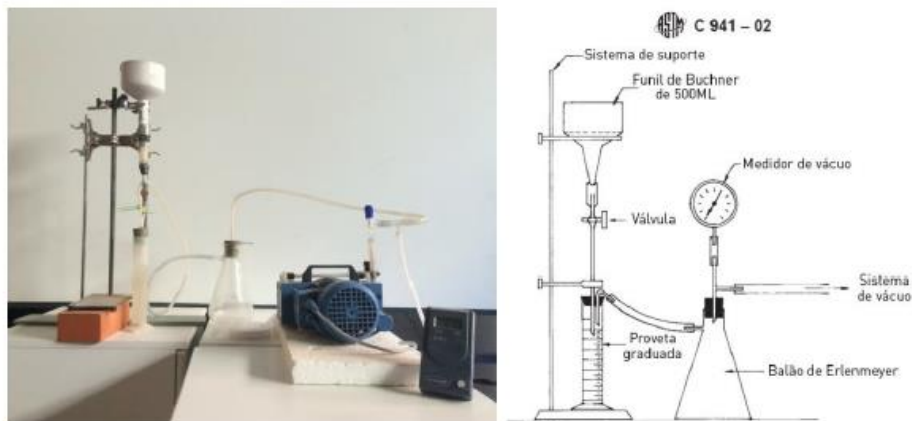


Figura 3.10: Ensaio de retenção de água (esq.) e esquema representativo do ensaio (dir.)

### 3.2.5. Ensaio de injetabilidade - modelo de coluna francesa

Como referido no capítulo anterior e segundo Kalagri et al. (2010), a injetabilidade pode ser o parâmetro chave para que uma intervenção de consolidação recorrendo à injeção de *grout* seja considerada como eficaz. Em conformidade com os testes realizados por Biçer-Şimşir e Rainer (2013) e com o objetivo de avaliar a influência da temperatura, tempo de repouso e diferentes dosagens de hidrófugo na injetabilidade do *grout*, realizaram-se ensaios de injeção com recurso ao modelo de “coluna francesa” (“sand column-test” em inglês). Em trabalhos realizados por diversos autores (Almeida et al., 2012; Biçer-Simsir et al., 2009; Kalagri et al., 2010; Miltiadou-Fezans & Tassios, 2013; Papayianni & Pachta, 2014; Jorne, 2016; Neno, 2016) a injetabilidade de uma amostra *grout* foi avaliada usando este modelo. Trata-se de um

procedimento bastante simples que permite simultaneamente retirar conclusões relativamente à fluidez, penetrabilidade e estabilidade do *grout* (Jorne, 2016).

O modelo de ensaio é composto por uma coluna de acrílico transparente, preenchida com material granular, com um diâmetro de 26 mm e uma altura de 400 mm, dos quais apenas 350 mm são considerados para o efeito do ensaio, pois os restantes 50mm são necessários para colocação de uma rolha no topo da coluna. A coluna deverá ser montada verticalmente e com marcações efetuadas ao longo da altura, de 50 em 50 mm, permitindo verificar os sucessivos níveis alcançados pelo *grout* durante o processo de injeção e o registar o tempo de escoamento correspondente. Salienta-se o facto de que foi utilizada uma câmara de filmar para registar o ensaio, para fins de obtenção de um registo mais pormenorizado do escoamento do *grout* ao longo da coluna.

Como material granular (meio poroso a injetar), e de acordo com estudos anteriores (Jorne, 2016; Neno, 2016), foi escolhida uma mistura de diferentes areias, da marca AREIPOR, com o objetivo de simular o núcleo do interior de uma parede de alvenaria antiga. Apesar deste tipo de areia apresentar uma capacidade de absorção de água mais reduzida relativamente a outros materiais, por exemplo o tijolo cerâmico, apresenta no entanto alguma dificuldade de penetração devido à sua distribuição granulométrica, particularmente quando a percentagem de finos assume valores significativos. O ensaio foi igualmente conduzido utilizando tijolo cerâmico como meio poroso. Este material foi obtido através do esmagamento de tijolos por ação mecânica. Sendo um material que apresenta uma elevada capacidade de absorção de água, o uso deste material teve como objetivo estudar a influência da adição de silicone na injetabilidade do *grout*. Previamente à colocação na coluna, os materiais foram lavados e secos em estufa. Foram adotadas quatro areias com granulometrias diferentes, e tijolo britado com duas granulometrias de acordo com o apresentado na tabela 3.8 e na figura 3.11.

Tabela 3.8: Designação e dimensão das areias da marca AREIPOR e material cerâmico

<b>DESIGNAÇÃO E DIMENSÃO DAS AREIAS DA MARCA AREIPOR</b>			
<b>APAH 20</b>	<b>APAH 12</b>	<b>APAH 6</b>	<b>APAH 4</b>
Muito fino (f) 0,5 mm – 1,18 mm	Fino (F) 1,18 mm – 2,36 mm	Médio (M) 2,36 mm – 4,75 mm	Grosso (G) 4,75 mm – 9,5 mm
<b>TIJOLO CERÂMICO BRITADO</b>			
Grosso (G) 4,75 mm – 9,5 mm		Fino (F) 0,15 mm – 2,36 mm	





Figura 3.11: Granulometrias das areias estudadas: a) Muito fino; b) fino; c) Médio; d) Grosso

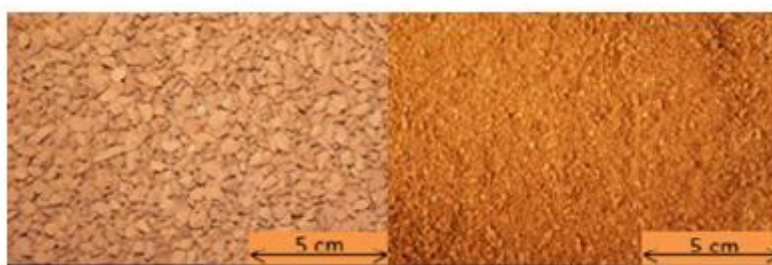


Figura 3.12 - Granulometria utilizada para o material cerâmico: Grosso (esq.) e Fino (dir.)

As misturas que compõem os meios porosos a injetar, idealizadas por outros autores em estudos anteriores (Neno, 2016; Jorne, 2016), pretende simular o núcleo de uma alvenaria antiga. Estes meios porosos são compostos por misturas de diferentes percentagens em massa das quatro diferentes areias mencionadas e tijolo britado como apresentado na tabela 3.9.

Tabela 3.9: Composição dos meios porosos adotados

<b>COMPOSIÇÃO DO MEIO POROSO</b>				
<b>Areias constituintes (%)</b>				
<b>40G/40M/15F/5f</b>	Grosso (G)	Médio (M)	Fino (F)	Muito fino (f)
	40	40	15	5
<b>Tijolo britado (%)</b>				
<b>MP B (2/3 G + 1/3 F) (Jorne, 2016)</b>	Grosso (G)	Médio (M)	Fino (F)	Muito fino (f)
	66,6	-	33,3	-

O conhecimento do meio poroso a injetar, como referido anteriormente, é um fator de grande importância quando se trata de injeções de *grout*, daí terem sido estudadas as características dos meios porosos como conjunto, procedendo-se ao estudo da distribuição granulométrica (figura 3.13), baridade e porosidade (tabela 3.10).

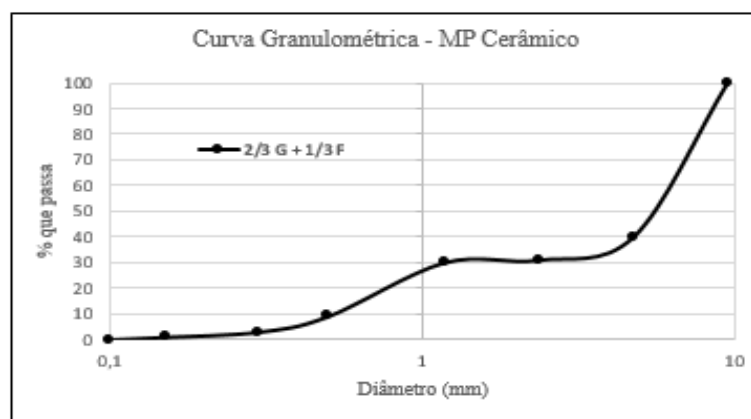
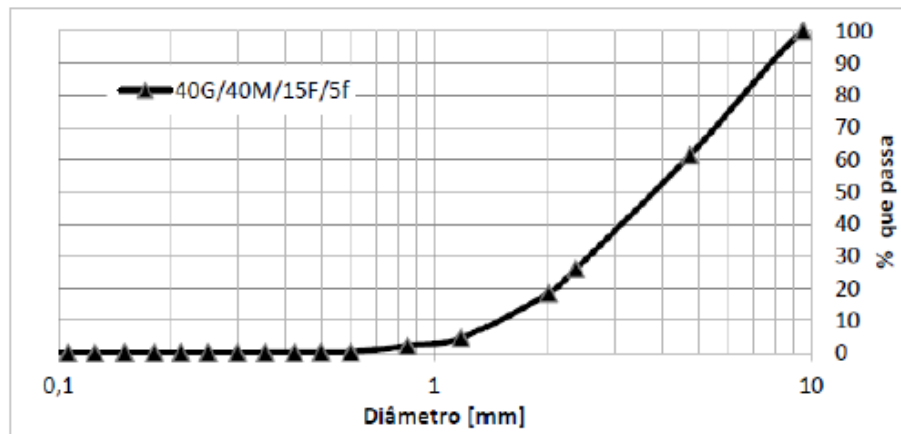


Figura 3.13: Curvas granulométricas dos meios porosos compostos por areia e material cerâmico (Jorne, 2016)

Tabela 3.10: Baridade e porosidade dos diferentes materiais granulares analisados (Neno, 2016)

CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS GRANULARES			
Areias AREIPOR	Designação	Baridade (g/cm <sup>3</sup> )	Porosidade (%)
	Grosso (G)	1,44	45,76
	Médio (M)	1,42	45,90
	Fino (F)	1,40	46,42
	Muito fino (f)	1,39	46,56
Meio Poroso	<b>40G/40M/15F/5f</b>	<b>1,50</b>	<b>42,41</b>

Tabela 3.11 - Características do meio poroso composto por material cerâmico (Jorne, 2016)

CARACTERÍSTICAS DO MEIO POROSO CERÂMICO – MP B (2/3 G + 1/3 F)	
<b>Diâmetro médio dos poros (mm)</b>	5,97
<b>d(90) (mm)</b>	8,97
<b>d(15) (mm)</b>	1,52
<b>Porosidade (%)</b>	51,5

Para preparação do ensaio, a coluna deverá ser preenchida com o meio poroso a injetar até aos 350 mm de altura. Importa referir, que antecipadamente à colocação do meio poroso, foi introduzido na base da coluna uma camada de material grosseiro (calcário) formando uma camada de enrocamento com cerca de 2 cm. Este procedimento, idealizado por Jorne (Jorne, 2016.), tem como finalidade impedir o entupimento conferido pelo adensamento do meio poroso da zona onde se inicia a injeção e reduzir os efeitos de turbulência provocados pela entrada do *grout*. No topo da coluna, nos restantes 50 mm, é colocada uma rolha equipada com um tubo flexível que encaminhará o *grout* extraído por excesso para uma proveta. De seguida o *grout* é vertido cuidadosamente para o interior de uma panela de injeção, com pressão controlado e constante de 0,70bar. A figura 3.14 pretende clarificar o esquema de montagem através de uma foto real e uma ilustração do sistema de ensaio.

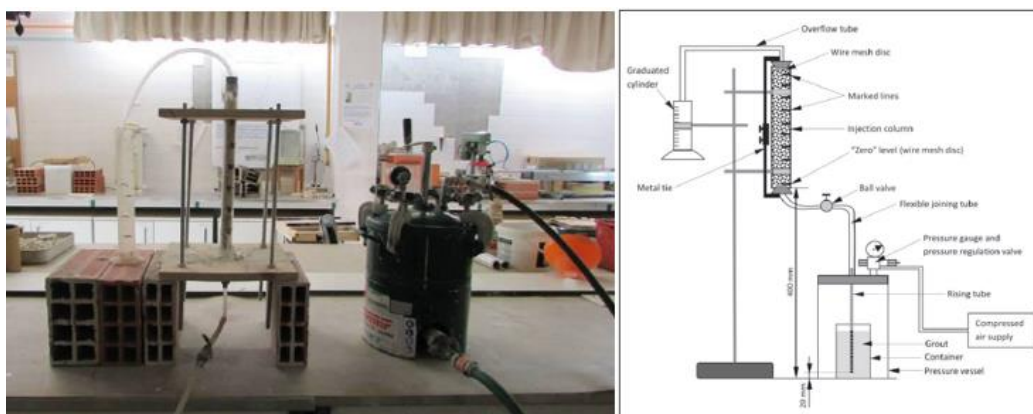


Figura 3.14: Modelo real de coluna francesa e respetivo esquema de ensaio

De acordo com a norma de ensaio e os autores Biçer-Şimşir e Rainer (2013) o processo de injeção será avaliado segundo dois parâmetros:

- 1) O tempo de escoamento, ou seja, o intervalo de tempo percorrido até o *grout* atingir determinada altura na coluna;
- 2) Caudal de *grout* retirado em excesso para a proveta graduada.

Através do primeiro parâmetro torna-se possível traçar graficamente as curvas de injetabilidade com a evolução da altura atingida em função do intervalo de tempo percorrido. No que diz respeito ao caudal de escoamento, este será determinado através do tempo necessário para recolher determinado volume na proveta graduada. Através da determinação destes dois parâmetros, o *grout* poderá ser classificado quanto à sua injetabilidade. Deste modo, o *grout* poderá ser classificado como indicado na tabela 3.11, quando verificados alguns pressupostos, sendo a altura atingida na coluna ( $h$ ), o volume retirado para o interior de uma proveta ( $V_{\text{proveta}}$ ) e o caudal retirado.

Tabela 3.12: Classificação do *grout* quanto à injetabilidade (Biçer-Şimşir, & Rainer, 2013)

CLASSIFICAÇÃO DO <i>GROUT</i>		
Fácil injeção	Possível injeção	Difícil injeção
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>h = 350 \text{ mm}</math></li> <li>▪ <math>V_{\text{proveta}} &gt; 20 \text{ ml}</math></li> <li>▪ Caudal <math>\geq 1 \text{ ml/s}</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>h = 350 \text{ mm}</math></li> <li>▪ <math>V_{\text{proveta}} &lt; 20 \text{ ml}</math></li> <li>▪ Caudal <math>&lt; 1 \text{ ml/s}</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>h &lt; 350 \text{ mm}</math></li> <li>▪ Velocidade escoamento <math>&lt; 30 \text{ mm/s}</math></li> <li>▪ Caudal <math>= 0</math></li> </ul>

Recorrendo a este procedimento de ensaio foram avaliadas as injetabilidades das nove amostras de *grout* idealizadas. De forma a avaliar a influência do tempo de repouso, as injeções foram feitas após a preparação da mistura (0 minutos) e após decorridos 60 minutos. Ainda no que diz respeito à temperatura das amostras de *grout* foi tido em conta o facto de o meio poroso a injetar estar à mesma temperatura que o *grout*, tendo sido previamente colocado em estufa para aquecimento e no frigorífico para arrefecimento. Relativamente ao *grout*, durante os 60 minutos em que se encontra em repouso após a mistura, teve-se o cuidado de manter constante a sua temperatura de conceção. Assim, para 40°C foi conservado num recipiente e colocado numa cuba com água a esta temperatura, e para 5°C foi mantido num frigorífico, como ilustra a figura 3.15. Para a temperatura de 20°C o *grout* foi conservado numa sala condicionada com as condições ambiente de temperatura 20°C e humidade relativa de  $60 \pm 5\%$ .



Figura 3.15: Banho concebido para conservação da temperatura do grout

### 3.3. Ensaios realizados no estado endurecido

O estudo do *grout* no seu estado endurecido deve ser tido em conta, pois após o *grout* se encontrar no estado endurecido no interior do núcleo da alvenaria irá estar sujeito a esforços mecânicos, em particular de compressão e flexão. De forma a prever a durabilidade da intervenção, as resistências mecânicas que o *grout* apresenta quando sujeito a este tipo de solicitações é fulcral para o sucesso da intervenção, pois estas resistências deverão contribuir para o incremento do comportamento monolítico, e consequentemente, para o aumento da resistência mecânica de todo o elemento (Jorne et al., 2015).

As amostras de *grout* estudadas na presente campanha experimental, para além de superplastificante, apresentam na sua constituição silicone líquido (hidrófugo) adicionado durante o seu processo de mistura em diferentes quantidades. Com o objetivo de avaliar o efeito produzido por este adjuvante (silicone) e a temperatura de mistura, foram produzidos provetes prismáticos, com dimensões de 40x40x160 mm, para posteriormente à sua cura (28 dias) serem estudadas as resistências mecânicas à flexão e compressão e a porosidade aberta. Após 48 horas da introdução nos moldes, as amostras foram retiradas e conservadas às temperaturas de 5°C, 20°C e 40°C, durante o restante período de cura.



Figura 3.16: Fabrico dos provetes prismáticos (esq.) e conservação da temperatura durante o processo de cura em estufa e camara frigorífica (direita cima e baixo respetivamente)

Salienta-se o facto de que para efeitos de realização dos ensaios destrutivos de resistência à flexão e resistência à compressão foram previamente recolhidas as dimensões dos provetes a ensaiar com recurso a uma craveira, nomeadamente o comprimento, a largura e a altura.

### 3.3.1. Ensaio de resistência à flexão

Para a realização deste ensaio recorreu-se a um equipamento denominado de ZWICK/ROELL Z050 com célula de carga de 2 kN. Utilizando este equipamento definiu-se o valor de 10N para a pré-carga e 0,2mm/min de velocidade de aplicação da força.

O ensaio de resistência à flexão consiste na aplicação de uma força aplicada a meio vão do provete prismático, quando este se encontra suportado inferiormente por dois apoios a uma distância de 100mm. Teve-se o cuidado de colocar o provete de forma a que a zona de aplicação da carga se encontra-se equidistante de ambos os apoios, escolhendo-se a face que apresentava maior regularidade e planeza para aplicação da carga. Seguidamente, a carga é aplicada de forma gradual e à velocidade escolhida para o efeito, tendo sido registada através de um software o valor da carga aplicada e a deformação correspondente. O ensaio dá-se por terminado quando o provete entra em rotura, registando-se o valor máximo da força aplicada ( $F_f$ ) que permitirá efetuar o cálculo da resistência à flexão através da equação seguinte

$$R_{Flexão} = \frac{1,5 \times F_f \times L}{a \times b^2}$$

Em que,  $R_{flexão}$  representa a resistência à flexão (MPa),  $F_f$  representa a carga de rotura à flexão (N),  $L$  representa a distância fixa entre apoios, na face inferior do provete (mm),  $a$  representa a largura do provete relativamente à posição de aplicação da carga (mm) e  $b$  representa a altura do provete relativamente à posição de aplicação da carga (mm).

Através da figura 3.17 pretende-se ilustrar o sistema de ensaio e o modo de rotura apresentado pelo provete após aplicação da carga máxima.



Figura 3.17: Ensaio de resistência à flexão na ZWICK/ROELL Z050 e modo de rotura do provete (dir)

### 3.3.2. Ensaio de resistência à compressão

Para o ensaio de resistência à compressão foram usadas como amostras a metades obtidas da divisão do provete após o ensaio de resistência à flexão. Neste ensaio recorreu-se ao mesmo equipamento (ZWICK) no qual foram alterados o valor da pré-carga para o valor de 50N e a velocidade de aplicação da força de 0,7 mm/min.

Assim, cada amostra é colocada de forma centrada num dispositivo de compressão metálico que assegura uma área de contacto fixa, nomeadamente de secção quadrada com dimensões de 40x40mm, como ilustrado na figura 3.18. Em seguida, a carga é aplicada de forma continua até à rotura do provete, registando-se o valor máximo da força aplicada ( $F_c$ ), determinando-se a resistência à compressão através da expressão seguinte.

$$R_{compressão} = \frac{F_c}{A}$$

Em que  $F_c$  (N) representa a força de compressão máxima que levou à rotura do provete e  $A$  a área de contacto de aplicação da carga (mm<sup>2</sup>).





Figura 3.18: Ensaio de resistência à compressão na ZWICK/ROELL Z050

### 3.3.3. Ensaio de porosidade aberta

Após a realização dos ensaios destrutivos, utilizando as restantes metades sobrantes do ensaio de resistência à flexão, realizou-se um ensaio para determinar a porosidade aberta do *grout* no seu estado endurecido. O presente ensaio foi efetuado com base na norma europeia EN 1936-2008 (IPQ, 2008) e tem como objetivo determinar a relação entre o volume de vazios e o volume aparente da amostra (volume da massa sólida mais o volume total dos vazios). O ensaio engloba um conjunto de cinco etapas representando um período total de cinco dias (120 horas).

A primeira etapa do ensaio tem como objetivo a secagem total das amostras. Os provetes de *grout* deverão ser mantidos num estufa ventilada à temperatura de  $60 \pm 5^\circ\text{C}$  durante 24h até se encontrarem totalmente secos. Os provetes foram retirados da estufa após a sua secagem registando-se a sua massa ( $m_1$ ) numa balança com precisão de 0,001g.

Tendo sido registada a massa seca dos provetes, os mesmos foram seguidamente introduzidos num exsiccador durante 24 horas, que com o auxílio de uma bomba de vácuo possibilitou a remoção de todo o ar existente nos poros dos provetes (segunda etapa).





Figura 3.19: Colocação das amostras de grout em estufa para secagem (esq.); Equipamento utilizado para determinação da porosidade aberta (dir.)

Concluído o período de 24 horas no interior do exsicador, sem que se alterem as condições no interior, ou seja, mantendo o vácuo no interior do exsicador, procedeu-se à introdução de água dentro do dispositivo até que a totalidade dos provetes se encontra-se submersa (terceira etapa). Os provetes mantiveram-se submersos e submetidos a vácuo durante 24 horas para que a totalidade dos seus poros, anteriormente preenchidos com ar, fossem seguidamente preenchidos com água. Numa quarta etapa, posteriormente a terem sido submersos, desligou-se a bomba de vácuo mantendo-se os provetes igualmente submersos mas sujeitos à pressão ambiente.

Numa quinta e última etapa, os provetes foram retirados do exsicador para serem efetuadas duas pesagens, uma pesagem hidrostática e uma pesagem saturada. A pesagem hidrostática é efetuada com o auxílio de um cesto introduzido num recipiente com água e suspenso na base da balança, o qual irá permitir a pesagem dos provetes mantendo-os totalmente submersos, registando-se desta forma a massa submersa ( $m_2$ ). Para o registo da massa saturada ( $m_3$ ), os provetes foram previamente limpos com um pano humedecido, retirando assim o excesso de água, e colocados seguidamente no prato da balança para registo da massa. Na figura 3.20 encontram-se demonstrados os procedimentos referentes às pesagens hidrostáticas e saturadas.



Figura 3.20: Pesagem hidrostática (esq. e meio) e pesagem saturada (dir.)

Posteriormente a terem sido efetuadas as pesagens para todas as amostras torna-se possível determinar a porosidade aberta, em percentagem, recorrendo à seguinte expressão:

$$P_{aberta} = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2} \times 100$$

#### 3.3.4. Ensaio de retração

Com o objetivo de avaliar a retração apresentada pelos diferentes *grouts* concebidos foi conduzido um ensaio de retração baseado no ensaio proposto pelo *Getty Conservation Institute - Laboratory Testing Procedures* (Biçer-Şimşir, B., 2013). Segundo este ensaio a estabilidade volumétrica do *grout* é avaliada através da alteração do seu volume após desenvolvido o seu processo de cura.

Para a realização deste ensaio, é necessária a preparação de um meio poroso sendo este seguidamente colocado num recipiente. O meio poroso idealizado é composto por uma argamassa de cal hidráulica HL5 e agregado monogranular (areia APAH 12 da marca AREIPOR) num traço de 1:4 (ligante:agregado). As características da argamassa que compõe o meio poroso encontram-se descritas na tabela 3.13.

Tabela 3.13 - Características da argamassa que compõe o meio poroso

Propriedades do meio poroso			
Traço (ligante:agregado)	Massa volúmica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Porosidade (%)	Coefficiente de absorção capilar (kg/m <sup>2</sup> .s <sup>1/2</sup> )
1:4	2,3	48,3	0,62

Esta argamassa deverá seguidamente ser colocada em recipientes (taças). As taças adotadas para a realização deste ensaio apresentavam uma profundidade de 6cm e um diâmetro de 11cm. Após a colocação da mistura na taça e tendo decorrido um período de tempo suficiente para que a mistura obtenha alguma presa, é removido um volume de aproximadamente 50 cm<sup>3</sup> do centro da taça com auxílio de um cilindro de 5cm de diâmetro e de uma colher, como demonstrado na figura 3.21, formando a cavidade onde o *grout* será inserido para teste.



Figura 3.21: Remoção do volume para formação da cavidade para posterior introdução de *grout* para ensaio

Removido o volume do centro da taça, a mistura deverá passar por um processo de cura de aproximadamente 28 dias a uma temperatura de  $20^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ , constituindo assim o meio poroso onde o *grout* deverá ser introduzido para avaliar a retração.

Após a cura do meio poroso no interior das taças, o *grout* é então inserido na cavidade da taça com recurso a uma seringa graduada registando-se o volume de *grout* inserido. Na figura 3.22 encontra-se ilustrado o processo de introdução do *grout* na taça e o aspecto final apresentado.



Figura 3.22: Introdução de *grout* na cavidade do meio poroso após a secagem

Para cada um dos *grouts* concebidos para estudo foram preparadas duas taças, perfazendo um total de 18 taças. Seguidamente ao seu preenchimento, as taças foram colocadas em locais com a mesma temperatura de conceção dos *grouts* (figura 3.23), para que a cura se procedesse à mesma temperatura a que foram realizadas as misturas, ou seja, às temperaturas de  $5^{\circ}\text{C}$  (camara frigorífica),  $20^{\circ}\text{C}$  (sala condicionada) e  $40^{\circ}\text{C}$  (estufa). Concluído todo este processo, a retração deverá ser registada após um período mínimo de cura de 24h. No presente trabalho, a retração foi

registada após um período de 15 dias. Deverão ser registadas as dimensões de separação entre o *grout* e a cavidade, e em caso de ocorrência de fendilhação do *grout*, deverá registar-se a dimensão da maior fenda apresentada. Através dos resultados obtidos, os *grouts* deverão ser classificados da seguinte forma:

- **NS** – *No Drying Shrinkage* – não ocorreu retração;
- **MS** – *Medium Drying Shrinkage* – tanto a separação entre o *grout* e a cavidade, como a maior fenda registada no *grout* são inferiores a 0,5 mm;
- **HS** – *High Drying Shrinkage* – tanto a separação entre o *grout* e a cavidade, como a maior fenda registada no *grout* são superiores a 0,5 mm;



Figura 3.23: Colocação das amostras em camara frigorifica (esq.) e estufa (meio) para cura; Totalidade das amostras ensaiadas (dir.)

Segundo Biçer-Şimşir (2013), a estabilidade volumétrica apresentada pelo *grout* é um parâmetro que afeta diretamente a adesão entre o *grout* o meio poroso e a durabilidade da intervenção. Trata-se assim de um ensaio que avalia um comportamento importante do *grout*, pois possui grande influência nas resistências mecânicas obtidas no seu estado endurecido (Brás, 2011; Mirza et al., 2013), devido ao baixo grau de compactação conferido pela retração sofrida.

## 4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios realizados durante a campanha experimental referenciada no capítulo anterior. No decorrer deste capítulo, os resultados alcançados serão analisados e discutidos com base nos pressupostos teóricos pela bibliografia.

A estrutura do capítulo é dividida em duas fases distintas. A primeira fase configura a avaliação das propriedades dos diferentes *grouts* em estudo no seu estado fresco e segunda fase no estado endurecido. Ambas as fases têm como objetivo avaliar a influência da ação combinada entre a adição de diferentes dosagens de hidrófugo (silicone), a temperatura e o tempo de repouso, no comportamento do *grout* à base de cal hidráulica.

### 4.2. Avaliação das propriedades do *grout* no estado fresco

#### 4.2.1. Ensaio de cone de Marsh

Através deste ensaio pretende-se estudar a fluidez, permitindo também este ensaio retirar algumas conclusões relativamente à viscosidade dos diferentes *grouts* concebidos. Todas as diferentes formulações foram submetidas ao respetivo ensaio para três tempos de repouso diferentes, nomeadamente ao 0, 30 e 60 minutos. Como recomendado por Miltiadou-Fezans e Tassios (2012), a fluidez do *grout* é avaliada em função do fator de fluidez (mm/s) apresentado pelo material. Os resultados obtidos para o fator de fluidez são de seguida apresentados nas figuras 4.1, 4.2 e 4.3, salientando-se o facto de que em todas as misturas de *grout* concebidas foi mantida constante a quantidade de superplastificante numa percentagem correspondente a 2% da massa total de ligante.

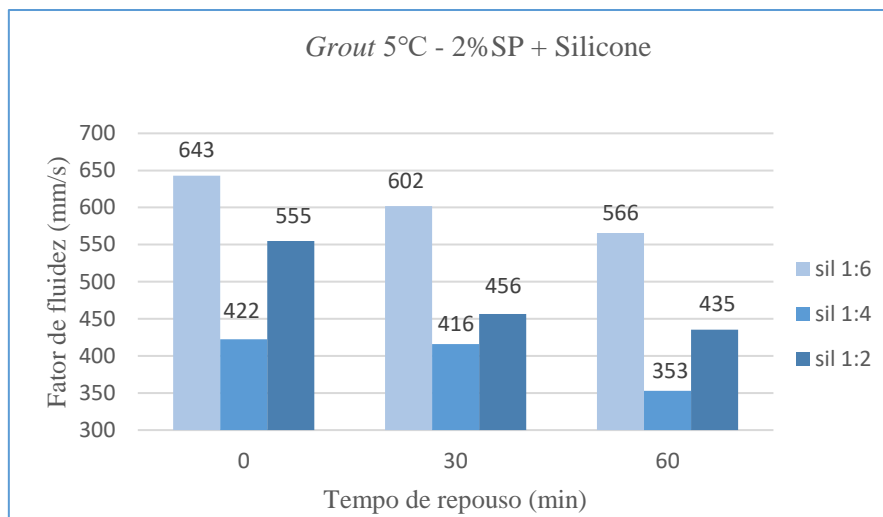


Figura 4.1: Resultados alcançados para o fator de fluidez do *grout* a 5°C com 2% superplastificante e com diferentes dosagens de silicone para diferentes tempos de repouso

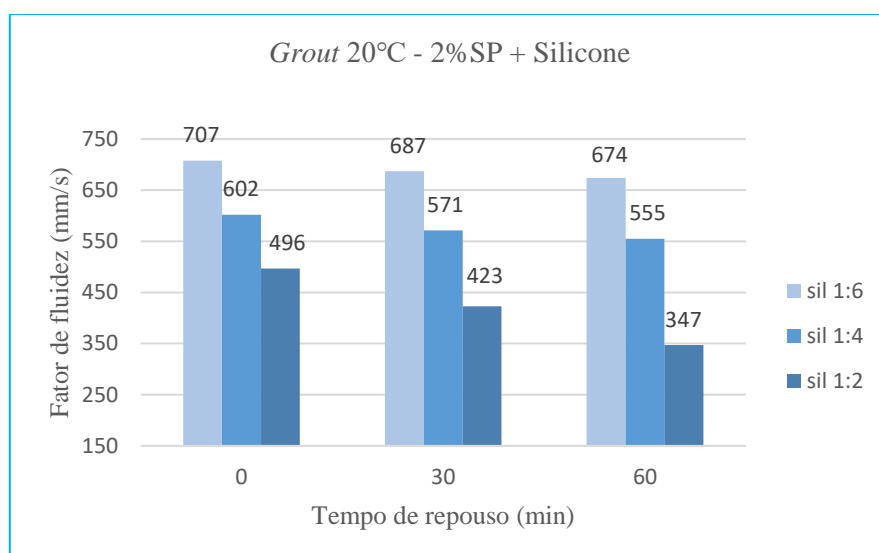


Figura 4.2: Resultados alcançados para o fator de fluidez do *grout* a 20°C com 2% superplastificante e com diferentes dosagens de silicone para diferentes tempos de repouso

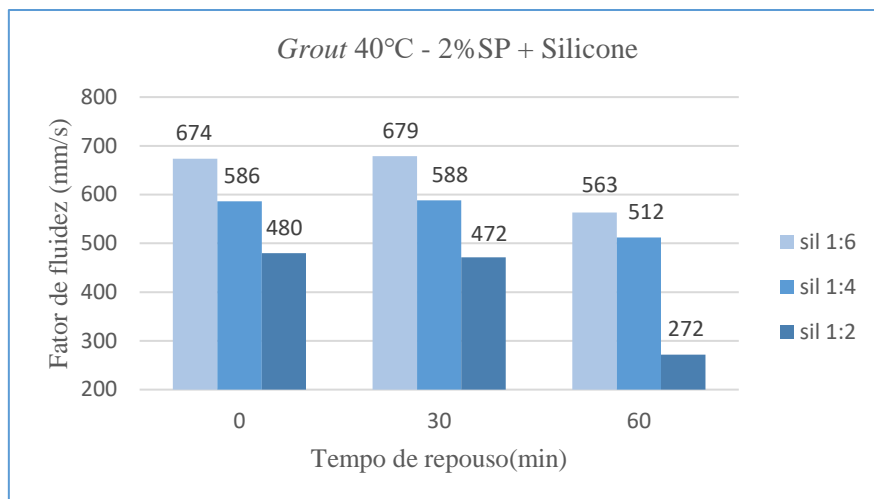


Figura 4.3: Resultados alcançados para o fator de fluidez do *grout* a 40°C com 2% superplastificante e com diferentes dosagens de silicone para diferentes tempos de repouso

Como primeira observação, através dos resultados obtidos é possível constatar que existe uma tendência para uma diminuição do fator de fluidez associado ao aumento da concentração de silicone na mistura. Esta tendência vai de acordo com o referido anteriormente no capítulo referente à análise do conhecimento (vd. 2.4.2.), apontando-se para o facto de que a adição de silicone ao *grout* proporciona o aumento da viscosidade (Neno, 2016), logo o fator de fluidez apresentado será mais reduzido. Esta tendência apenas não foi verificada para o *grout* concebido à temperatura de 5°C, nomeadamente a mistura que contempla um traço de silicone de 1:2 (silicone/água). Esta mistura com uma dosagem mais concentrada de silicone apresenta-se como mais fluida que a mistura com traço de 1:4 (menos concentrada em silicone), para todos os três tempos de repouso analisados. Este acontecimento pode dever-se ao facto de esta mistura apresentar instabilidade considerável, como será possível verificar posteriormente com os resultados obtidos para o ensaio de estabilidade (vd. 4.2.4). Esta instabilidade pode dever-se à alteração da microestrutura do *grout* conferida pelo silicone, promovendo uma maior heterogeneidade da suspensão, devido à sua interferência no equilíbrio de forças inter-partículas, influenciando os resultados obtidos para o fator de fluidez da mistura.

Relativamente à ação combinada do tempo de repouso e da temperatura, verificam-se os pressupostos mencionados nos subcapítulos referentes as estes dois parâmetros (vd. 2.2.4 e 2.2.5). É possível verificar que para todos os *grouts* concebidos, à medida que o tempo de repouso aumenta a fluidez vai sendo cada vez mais reduzida, devendo-se ao facto de que o *grout*, ao encontrar-se em repouso, proporciona uma maior floculação devido à hidratação das partículas de cal hidráulica. Este fenómeno torna-se mais acentuado no caso de temperaturas extremas de 5°C e 40°C, estando em concordância com as conclusões de Jorne (2015), que no seu estudo

verificou que a área de floculação variou com a temperatura, apresentando valores mais elevados para estas temperaturas, levando a uma perda de fluidez do *grout*. Para a temperatura de 20°C observam-se valores de fluidez superiores relativamente às temperaturas extremas e para todas as misturas, à exceção da mencionada anteriormente como instável. Tais resultados devem-se ao aumento do movimento Browniano das partículas conferido pelo aumento de temperatura de 5°C para 20°C, o que leva à diminuição da viscosidade plástica do *grout* e consequentemente um aumento da sua fluidez (Jorne, 2016.).

Um último aspeto é possível constatar através da observação da figura 4.3. Para os *grouts* concebidos a 40°C com traços de silicone de 1:2 e 1:4, observa-se um ligeiro aumento do fator de fluidez dos 0 minutos para 30 minutos. Este aumento pode dever-se ao facto de que durante o processo de mistura, a temperatura do *grout* tende a baixar por simples arrefecimento, fazendo com que o *grout* aos 0 minutos apresente uma temperatura inferior a 40°C. Seguidamente, o *grout* foi conservado num recipiente imerso em água a 40°C durante os 30 minutos que antecedem o segundo ensaio, promovendo um aumento da agitação térmica capaz de conferir um ligeiro acréscimo de fluidez. Contudo, este fenómeno poderá estar também associado à instabilidade da microestrutura do *grout* conferida pela elevada concentração de silicone.

Assim, torna-se possível afirmar que a adição direta de silicone na mistura do *grout* aumenta a viscosidade do *grout* reduzindo a sua fluidez e que, em convergência com os resultados de Neno (2016), o *grout* que apresenta melhor comportamento relativo à fluidez é o concebido a 20°C com um traço de silicone de 1:6.

#### 4.2.2. Ensaio de espalhamento

O ensaio de espalhamento, de igual forma ao ensaio de cone de Marsh, permite realizar o estudo da fluidez do *grout*, apresentando-se também como um indicador da tensão de cedência associada ao *grout* (Domone, 1998). Os diferentes *grouts* foram ensaiados para diferentes tempo de repouso, nomeadamente aos 0, 30 e 60 minutos após o processo de mistura. Os valores de espalhamento obtidos encontram-se expostos nas figuras 4.4, 4.5 e 4.6 para as diferentes temperaturas no processo de mistura do *grout*.



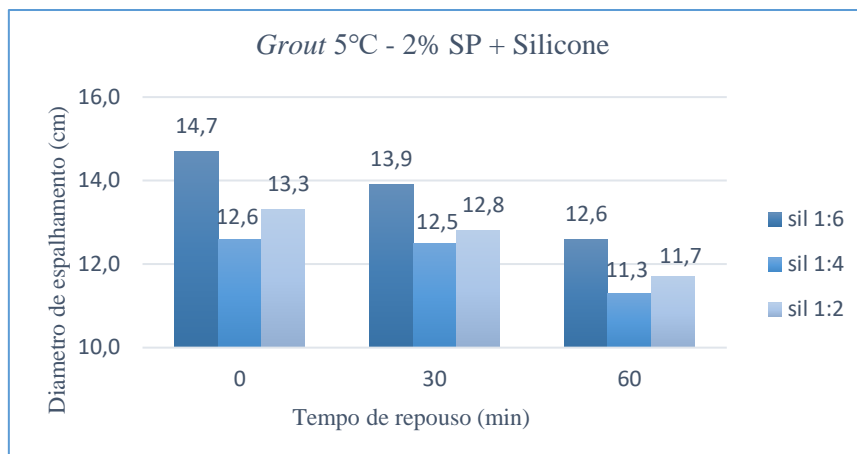


Figura 4.4: Resultados alcançados para o diâmetro de espalhamento do *grout* a 5°C com 2% superplastificante com diferentes dosagens de silicone e diferentes tempos de repouso

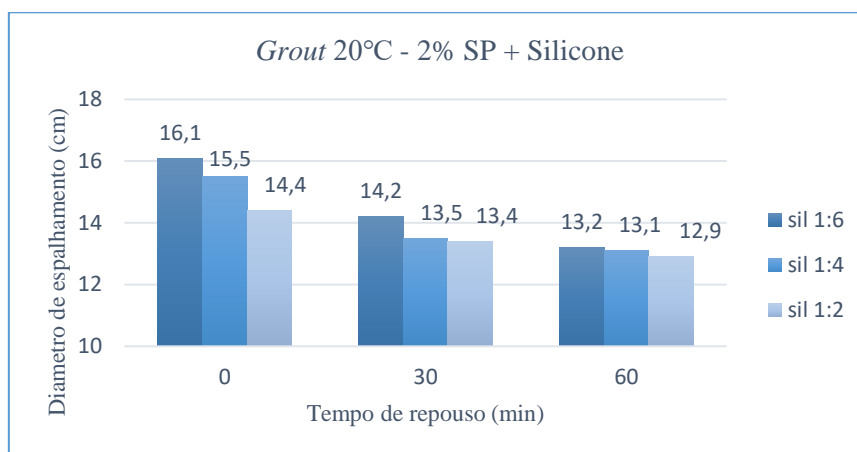


Figura 4.5: Resultados alcançados para o diâmetro de espalhamento do *grout* a 20°C com 2% superplastificante com diferentes dosagens de silicone e diferentes tempos de repouso

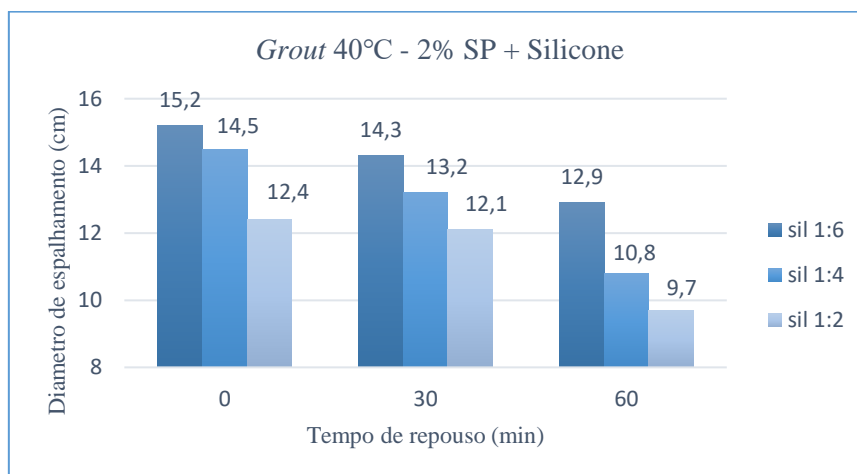


Figura 4.6: Resultados alcançados para o diâmetro de espalhamento do *grout* a 40°C com 2% superplastificante com diferentes dosagens de silicone e diferentes tempos de repouso

Os resultados obtidos para o ensaio de espalhamento, como observado através das figuras apresentadas, encontram-se em consonância com os resultados obtidos para o ensaio de cone de Marsh na medida em que apresentam as mesmas tendências. À exceção do *grout* concebido a 5°C com traço de silicone 1:4, todos os *grouts* apresentam um aumento do diâmetro de espalhamento à medida que a concentração de hidrófugo vai sendo reduzida. O resultado obtido para esta mistura (5°C - 2%SP + silicone 1:4) pode estar associado à instabilidade na microestrutura do *grout* causada pelas quantidades de adjuvantes na mistura, que podem levar a resultados diferentes dos esperados.

É também possível observar, e de acordo com o esperado, que à medida que o tempo de repouso aumenta o diâmetro de espalhamento vai sendo cada vez mais reduzido, devido ao estado de floculação apresentado pelo *grout* ao encontrar-se em repouso. A formação de aglomerados de partículas de ligante irá contribuir para uma maior ligação das partículas, isto é, uma menor dispersão, o que se traduz num valor superior de tensão de cedência (Neno, 2016).

Analisando os resultados para as diferentes temperaturas a que o *grout* foi concebido é facilmente perceptível que os valores do diâmetro de espalhamento são mais reduzidos para as temperaturas extremas (5°C e 40°C). Este fenómeno deve-se à redução do efeito repulsivo do superplastificante para estas temperaturas. Segundo Baltazar (2014.), o estado de floculação conferido pela formação de pontes de hidrogénio a temperaturas próximas do ponto de congelamento da água e as forças electroestáticas (forças atrativas) entre as partículas de ligante a temperaturas elevadas são mais fortes que a ação repulsiva do superplastificante. Desta forma, não só a adição de silicone mas também os parâmetros relacionados com a temperatura e tempo de repouso proporcionam um aumento da tensão de cedência do *grout*.

Recorrendo a este ensaio é possível chegar à conclusão que o *grout* que apresenta melhor comportamento é o concebido a 20°C com um traço de silicone de 1:6 para um tempo de repouso de 0 minutos, devido não só à baixa concentração de hidrófugo adicionada, como também à temperatura que permite que a ação do superplastificante contribua para uma melhoria do comportamento do *grout* no estado fresco.

#### 4.2.3. Ensaio de retenção de água

O ensaio de retenção de água configura-se como essencial no estudo das propriedades fundamentais do *grout* no seu estado fresco. Este ensaio foi realizado de forma a aferir a influência dos diferentes adjuvantes utilizados na mistura do *grout*, como também a influência das diferentes

temperaturas de amassadura do *grout* na capacidade de reter a sua componente líquida (água) durante um determinado período de tempo.

Tendo em consideração o mencionado no capítulo referente à análise do conhecimento (vd. 2.4), relativamente aos adjuvantes utilizados – superplastificante e silicone – é possível afirmar que ambos são capazes de conferir ao *grout* uma maior capacidade de retenção de água. O superplastificante devido à sua ação repulsiva permite que um maior número de partículas de ligante entre em contacto com a água da mistura, devido à maior dispersão de partículas, reduzindo consideravelmente a quantidade de água livre na suspensão (Biçer-Şimşir et al., 2009). O silicone, dadas as suas propriedades hidrofóbicas, confere ao *grout* a capacidade de retenção de água de amassadura (Neno, 2016).

Na figura 4.7 encontram-se expostos os resultados obtidos para a totalidade dos *grouts* concebidos, para os quais foi analisada a capacidade de retenção de água para um período de duas horas.

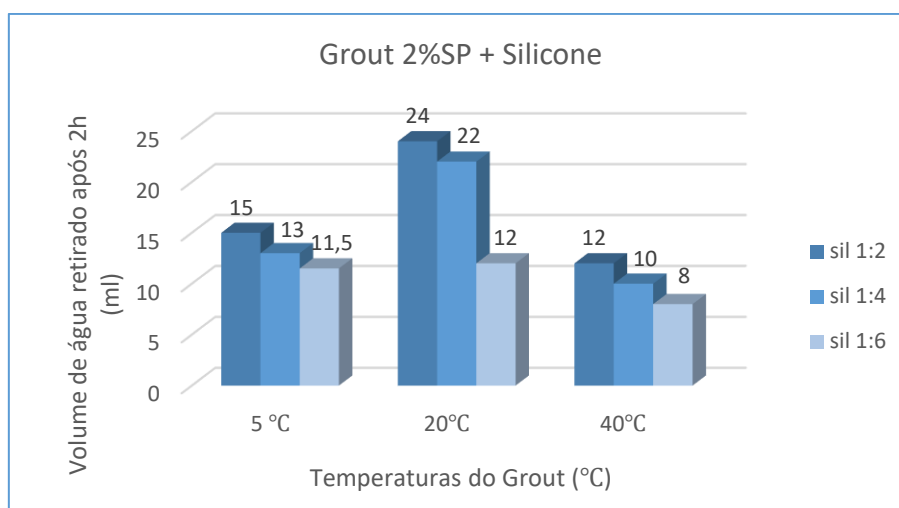


Figura 4.7: Resultados alcançados para o ensaio de retenção de água para os diferentes *grouts* formulados

Através da análise destes resultados é possível observar que os valores relativos ao volume de água retirado das suspensões é bastante reduzido. Comparativamente com o obtido por outros autores (Neno, 2016; Telha, 2016), que foram capazes de retirar cerca de 45 ml de água para um determinado período de tempo, estes valores são bastante inferiores, podendo ser considerados como bastante satisfatórios.

Expectavelmente, para a mesma dosagem de superplastificante, ao ser incrementada a concentração da solução de silicone adicionada ao *grout* durante a mistura, os valores de volume

de água retirados apresentam tendência para serem inferiores. Assim, torna-se possível afirmar que o incremento da concentração de silicone introduzido diretamente na mistura do *grout* favorece a capacidade de retenção de água da suspensão.

Observando a figura 4.7, relativamente às diferentes temperaturas de conceção dos *grouts*, verificar-se que para as temperaturas extremas de 5°C e 40°C os volumes de água retirados das suspensões são inferiores aos obtidos para 20°C. Existe no entanto uma ligeira diferença entre estas duas temperaturas extremas, apresentando a temperatura de 40°C valores inferiores de volume de água retirados, que podem ser devidos ao estado de floculação conferido pelas forças electrostáticas das partículas de ligante e às reações cinéticas de hidratação da cal hidráulica serem mais rápidas para temperaturas mais elevadas (Baltazar, 2014), o que origina um estado de hidratação mais avançado e conseqüentemente menor quantidade água livre na suspensão passível de ser retirada. Para a temperatura de 5°C, a formação de cristais de gelo devido à proximidade com o ponto de congelação da água confere ao *grout* um maior estado de floculação (Baltazar, 2014), daí, os valores obtidos para o volume de água retirados serem também reduzidos. Ao contrário das duas temperaturas extremas analisadas, para 20°C o facto de as reações de hidratação serem mais lentas permitiu que existisse mais água livre na suspensão, apresentando os *grouts* concebidos a esta temperatura volumes de água retirados superiores.

Com estes resultados torna-se possível afirmar que para efeitos de capacidade de retenção de água do *grout*, os adjuvantes adicionados, em particular o silicone, apresenta-se como bastante favorável para esta propriedade essencial do *grout* quando sujeito a diferentes temperaturas.

#### 4.2.4. Ensaio de estabilidade

Segundo Valluzzi (2005), o adequado controlo da estabilidade do *grout* o seu estado fresco, oferece uma garantia da qualidade deste material durante o processo de injeção até ao seu estado endurecido. De acordo com o procedimento desenvolvido por Van Rickstal (2000) a análise da estabilidade do *grout* é feita através do registo da variação da massa volúmica do *grout* em repouso num recipiente em função do tempo.

As figuras seguintes (figuras 4.8, 4.9 e 4.10) apresentam os resultados obtidos para a variação da massa volúmica das misturas de *grout* segundo o procedimento de ensaio utilizado.

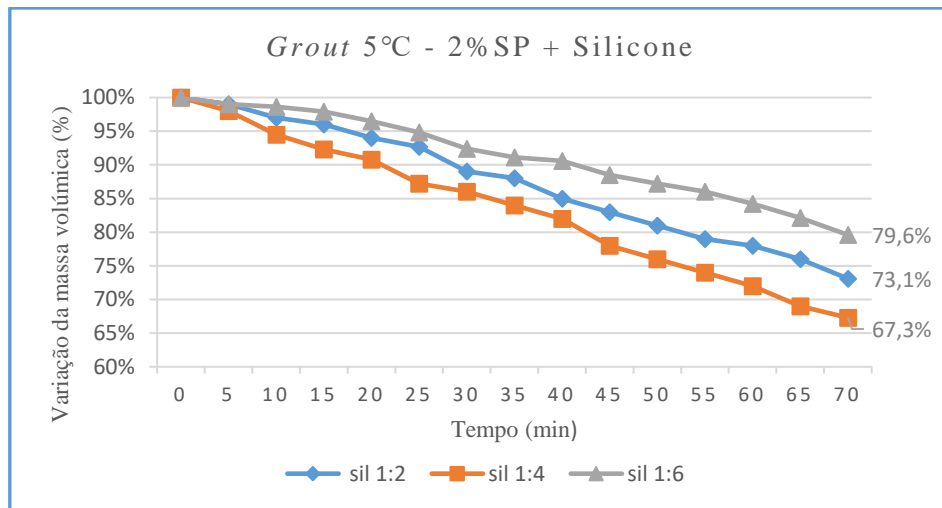


Figura 4.8: Resultados alcançados para a variação da massa volúmica dos *grouts* a 5°C no ensaio de estabilidade

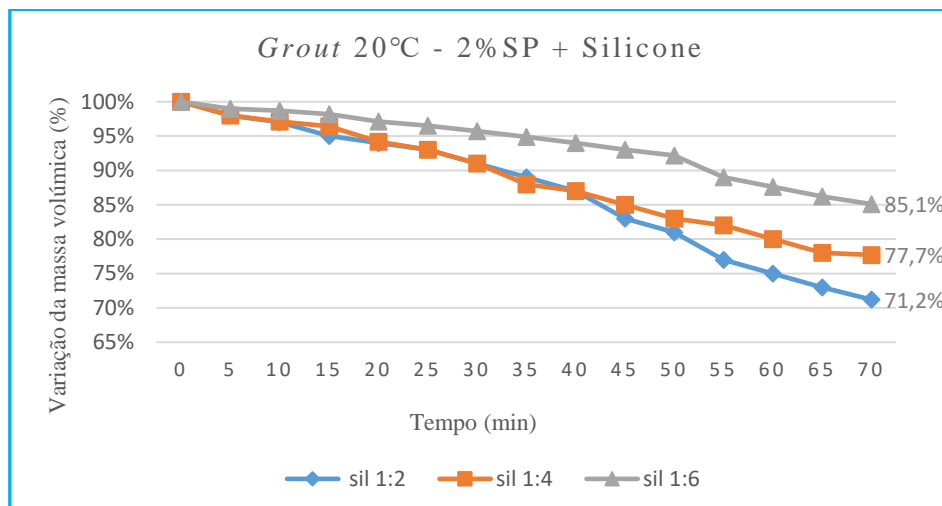


Figura 4.9: Resultados alcançados para a variação da massa volúmica dos *grouts* a 20°C no ensaio de estabilidade

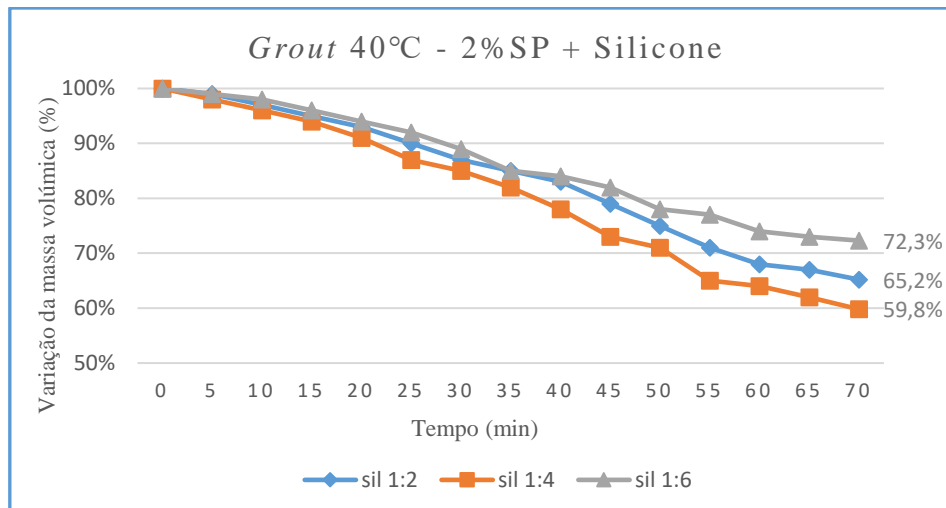


Figura 4.10: Resultados alcançados para a variação da massa volúmica dos *grouts* a 40°C no ensaio de estabilidade

Os resultados obtidos demonstram que os adjuvantes escolhidos para a conceção das misturas – superplastificante e silicone – têm forte influência na estabilidade do *grout*. Esta conclusão vai ao encontro com estudos desenvolvidos por outros autores (Neno, 2016; Miltiadou-Fezans & Tassios, 2013) que afirmam que quaisquer aditivos introduzidos na mistura do *grout* são passíveis de alterar a estabilidade, na medida em que interferem no equilíbrio de forças inter-partículas. É possível observar que todas as misturas, à exceção da concebida a 20°C com 2%SP e traço 1:6 (silicone/água), apresentam um grau de instabilidade relativamente elevado.

No seu estudo, Jorne (2016) concluiu que a adição de superplastificante, até à dosagem ótima (1,2% da massa total de ligante), promove uma melhoria bastante considerável na estabilidade do *grout* devido à sua ação repulsiva. Neno (2016) no seu estudo concluiu que a adição de silicone teria de ser compensada com um aumento da percentagem de superplastificante. Este autor, recorrendo ao mesmo ensaio utilizado no presente trabalho, concluiu que a mistura com melhor comportamento a nível de estabilidade apresenta uma quantidade de superplastificante de 2% e um traço de silicone de 1:6. O mesmo resultado foi obtido por Miguel (2017), que através de um ensaio no qual mediu o grau de exsudação atingido por esta mistura, verificou que o valor obtido para a exsudação era inferior a 1% o que indica uma estabilidade bastante satisfatória para a suspensão. Estes autores chegaram à conclusão que a adição de superplastificante e hidrófugo, em quantidades ideais, contribuem para uma elevada retenção de água e minimizam a ocorrência de fenómenos de instabilidade. Salienta-se o facto de que, nos estudos realizados pelos autores mencionados, os *grouts* analisados foram concebidos à temperatura ambiente de 20°C.

Tendo em conta os resultados obtidos e os estudos anteriores desenvolvidos no âmbito desta temática, torna-se possível afirmar que os fatores que contribuem para a instabilidade verificada para as misturas de *grout* são a dosagem de silicone adicionada ao *grout* e a temperatura de amassadura.

Para as diferentes dosagens de silicone, facilmente se conclui que para traços superiores a 1:6, ou seja, para elevadas concentrações deste material, o *grout* apresenta estabilidade reduzida. Tal facto pode dever-se à alteração da microestrutura do *grout* conferida pelo silicone, que irá promover uma maior heterogeneidade da suspensão, devido à interferência deste material no equilíbrio de forças inter-partículas. Esta alteração na micro-estrutura do *grout* irá promover os fenómenos de exsudação e segregação aumentando a instabilidade da suspensão (Miltiadou-Fezans & Tassios, 2013). Estes fenómenos, associados à temperatura de amassadura, podem ser a razão pela qual se obteve valores de variação da massa volúmica superiores no *grout* que contempla o traço 1:4 para as temperaturas extremas.

Relativamente à temperatura, os valores obtidos para as temperaturas extremas de 5°C e 40°C são inferiores aos obtidos para 20°C, apesar de estes também se configurarem como bastante reduzidos devido ao efeito produzido pelo silicone. Como mencionado anteriormente, a adição de superplastificante em quantidades ideais pode ser benéfica para o *grout* em termos de estabilidade devido ao seu efeito repulsivo. Contudo, para temperaturas extremas próximas do ponto de congelação da água e superiores a 20°C, o efeito repulsivo conferido pelo superplastificante é praticamente anulado. Para baixas temperaturas, neste caso de 5°C, a redução do efeito do superplastificante pode dever-se ao arranjo espacial das partículas adsorvidas deste material (Fernández-Altable & Casanova, 2006). Por outro lado, para temperaturas elevadas como a de 40°C, a rapidez das reações cinéticas hidratação da cal hidráulica e o aumento das forças electrostáticas das partículas de cal hidráulica são superiores à ação repulsiva do superplastificante (Hunter, 2001), provocando uma redução da influência deste material na estabilidade do *grout*.

Tendo em conta os resultados relativos à estabilidade das diferentes misturas concebidas, e em convergência com as conclusões obtidas por Neno (2016), o *grout* que apresenta melhor estabilidade é o que foi concebido a uma temperatura de 20°C com adição de 2% superplastificante e um traço de silicone 1:6, corroborando assim as conclusões apresentadas por este autor no âmbito da avaliação desta propriedade fundamental do *grout*.

#### 4.2.5. Ensaio de injeção em coluna francesa

Com o intuito de avaliar a influência da temperatura, tempo de repouso e dosagem de hidrófugo (silicone) introduzida diretamente na mistura do *grout*, procedeu-se à injeção dos *grouts* concebidos recorrendo ao modelo de coluna francesa. Através deste modelo reduzido procurou-se clarificar a importância destes três aspetos ao nível da injetabilidade de *grouts* destinados à consolidação de paredes de alvenaria antigas.

De forma a proporcionar uma exposição clara dos resultados, optou-se pela separação dos mesmos segundo a temperatura de preparação dos diferentes *grouts*, expondo para cada uma das temperaturas, as injeções efetuadas para os dois tempos de repouso (0 e 60 minutos). Após a análise dos resultados, com base nas curvas de injetabilidade, são apresentadas as conclusões quanto ao comportamento do *grout* durante o ensaio de injeção, procedendo-se à classificação do *grout* como facilmente injetável (fácil), possível de injetar (possível) ou de difícil injeção (difícil) (Biçer-Şimşir, & Rainer, 2013). Salienta-se o facto de que os resultados apresentados são referentes à média obtida através da realização de duas injeções para cada uma das suspensões idealizadas.

##### 4.2.5.1. Injeção com material arenoso

Numa primeira fase de execução do ensaio de injeção com o modelo de coluna francesa utilizou-se como meio poroso uma mistura de areias da marca AREIPOR. O meio poroso utilizado durante esta fase contemplou uma mistura de diferentes granulometrias (Grosso (G), Médio (M), Fino (F) e Muito Fino (f)) com uma distribuição em percentagem do tipo 40G/40M/15F/5f.

Procedendo à análise dos resultados alcançados, em primeiro lugar são expostas através das figuras 4.11 e 4.12 as curvas de injetabilidade para os *grouts* preparados à temperatura de 5°C.



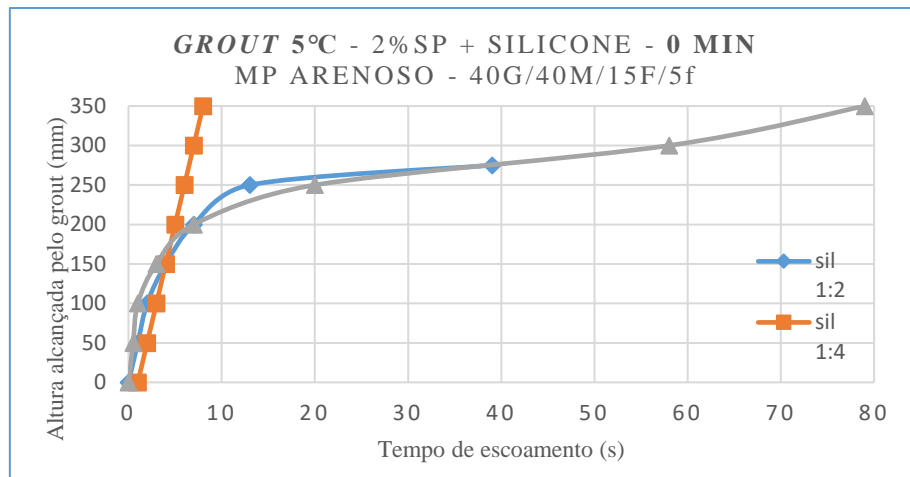


Figura 4.11: Curvas de injetabilidade obtidas para os *grouts* a 5°C e tempo de repouso de 0 minutos em meio poroso arenoso

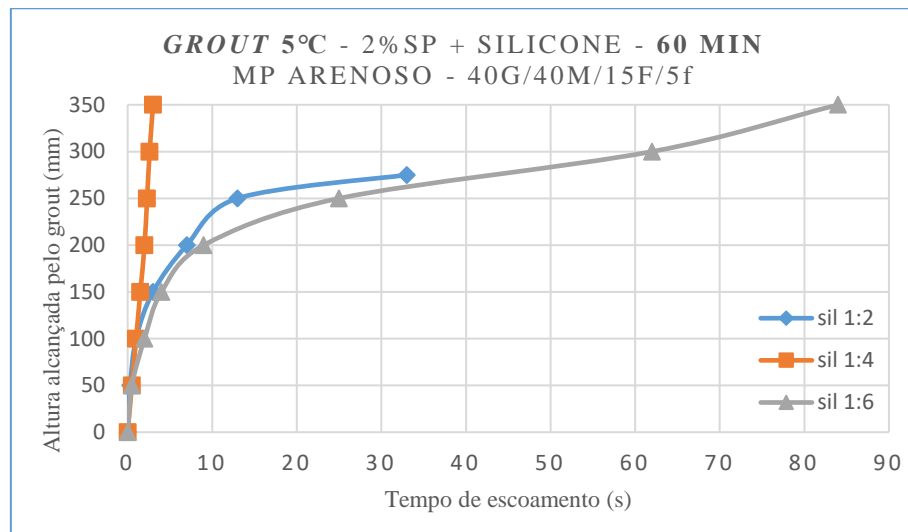


Figura 4.12: Curvas de injetabilidade obtidas para os *grouts* a 5°C e tempo de repouso de 60 minutos em meio poroso arenoso

Começando pela análise das curvas de injetabilidade obtidas para a mistura desenvolvida com um traço de silicone de 1:2, é possível constatar que as curvas de injetabilidade são muito semelhantes. Tanto a altura, atingida pelo *grout* na coluna, como o tempo de escoamento são muito próximos. Ainda assim, e como seria de esperar, para um tempo de repouso de 60 minutos, o tempo de escoamento é ligeiramente superior, devido ao aumento de viscosidade conferido pelo estado de flocculação atingido após o início da hidratação das partículas de cal hidráulica (Guerreiro, 2014; Jorne, 2016). A semelhança entre resultados pode ser explicada pelo efeito da temperatura na hidratação das partículas de cal hidráulica, pois para temperaturas reduzidas as reações de hidratação são mais lentas, ocorrendo de uma forma mais ou menos progressiva. (Neno, 2016). Com efeito, o *grout* conserva a sua água de amassadura durante um período de

tempo mais prolongado, e, como tal, as suas propriedades reológicas também serão mantidas durante mais tempo, reduzindo, assim, o efeito do tempo de repouso (Matos, 2013).

Para o *grout* com dosagem de silicone com um traço de 1:4, apesar da concentração de hidrófugo ser mais reduzida relativamente ao *grout* com 1:2, a diferença no tempo de escoamento é bastante acentuada. Esta diferença na velocidade do escoamento poderá ser consequência da instabilidade da mistura (vd. 4.2.4). Durante a realização do ensaio observou-se que o meio poroso existente no interior da coluna foi preenchido, na sua maioria, por uma calda heterogénea com uma componente líquida superior à da mistura inicial. Grande parte da componente sólida permaneceu no interior do dispositivo de injeção. Esta instabilidade conferida à suspensão, devido à adição de silicone, prejudica as propriedades fundamentais do *grout* no seu estado fresco, pondo em causa a qualidade do *grout* e a sua capacidade de injeção, afetando toda a intervenção de consolidação (Valluzzi, 2005). Relativamente ao *grout* com traço de 1:6 de silicone, é possível, novamente, observar uma semelhança nos resultados para os dois tempos de repouso analisados, pelas mesmas razões já mencionadas.

De acordo com Biçer-Şimşir e Rainer (2013) na tabela 4.1, estas três suspensões concebidas a 5°C são classificadas quanto à injetabilidade, apresentando-se também o volume de *grout* retirado para a proveta e a altura atingida pelo *grout* na coluna.

Tabela 4.1: Classificação da injetabilidade dos *grouts* concebidos a 5°C

<b>AValiação da Injeção – MP Arenoso - 5°C</b>						
<b>Grout 2%SP + Silicone</b>	<b>Tempo de repouso (min)</b>	<b>Altura alcançada (mm)</b>	<b>Tempo de escoamento (s)</b>	<b>Volume recolhido (ml)</b>	<b>Caudal (ml/s)</b>	<b>Classificação da injeção</b>
<b>sil 1:2</b>	0	275	39	-	-	<b>DIFÍCIL</b>
	60	275	33	-	-	<b>DIFÍCIL</b>
<b>sil 1:4</b>	0	350	8	32	0,7	<b>POSSÍVEL</b>
	60	350	3	40	4	<b>FÁCIL</b>
<b>sil 1:6</b>	0	350	79	-	-	<b>POSSÍVEL</b>
	60	350	84	-	-	<b>POSSÍVEL</b>

Observa-se através da tabela anterior que apenas a mistura com traço 1:4 regista volume recolhido em excesso no exterior da coluna, tendo este fenómeno ocorrido devido à heterogeneidade da mistura. Para as misturas com as concentrações extremas (traços 1:2 e 1:6) apenas a que apresenta o *grout* com 1:6 foi capaz de atingir a altura máxima de injeção correspondente a 350 mm. Contudo, o tempo de escoamento configura-se como bastante elevado.

Seguidamente são apresentadas na figura 4.13 e na figura 4.14, as curvas de injetabilidade dos *grout* concebidos a 20°C.

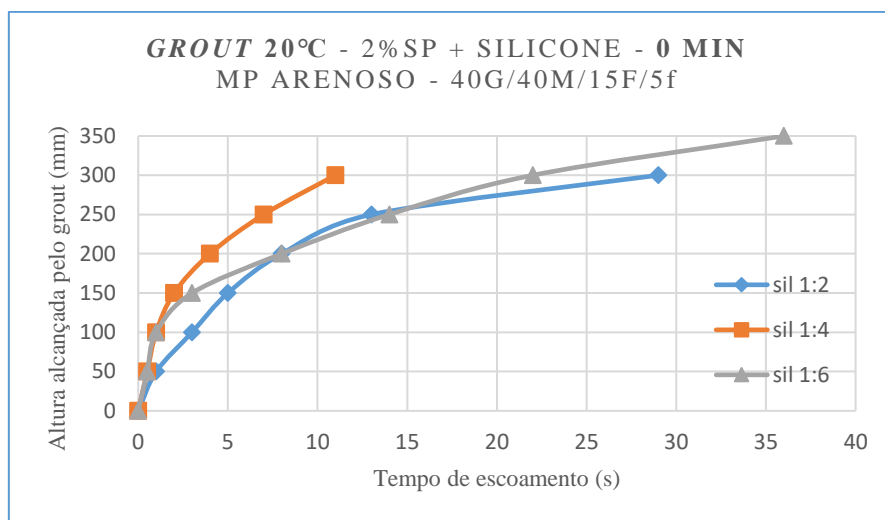


Figura 4.13: Curvas de injetabilidade obtidas para os grouts a 20°C e tempo de repouso de 0 minutos em meio poroso arenoso

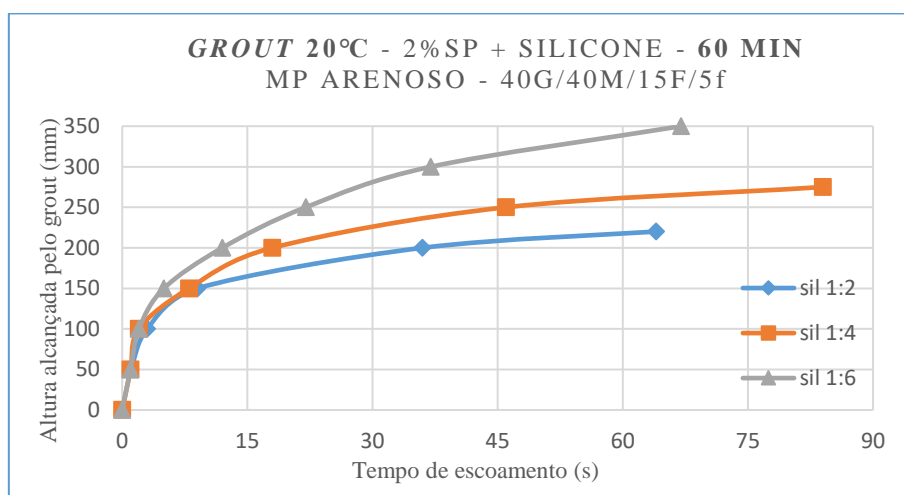


Figura 4.14: Curvas de injetabilidade obtidas para os grouts a 20°C e tempo de repouso de 60 minutos em meio poroso arenoso

Para a temperatura de 20°C, através da observação das figuras anteriores, é notória a diferença relativa aos tempos de escoamento registados para os *grouts* analisados. Como esperado, ocorre não apenas uma diminuição da altura atingida, como também um aumento do tempo de escoamento para as três suspensões. Este fenómeno deve-se à maior rapidez de hidratação das partículas de ligante, proporcionado pela temperatura à qual o *grout* foi concebido, que, ao potenciar a ocorrência de floculação, provoca um aumento de viscosidade plástica do *grout*, reduzindo a fluidez, e consequentemente, dificultando a injeção (Guerreiro, 2014).

Relativamente à constituição dos diferentes *grouts*, nomeadamente a concentração de hidrófugo, a sua influência é notória na qualidade da injeção. À medida que se diminui a concentração de silicone na mistura, a altura atingida pelos *grouts* vai sendo incrementada. Esta observação vai de encontro com o esperado, pois dadas as suas propriedades intrínsecas, o silicone aumenta a viscosidade da mistura (Neno 2016) prejudicando consideravelmente a injetabilidade do material.

De igual modo ao efetuado para os *grouts* com temperatura de 5°C, na tabela 4.2, apresenta-se a avaliação das misturas em função da sua capacidade de injeção no âmbito do procedimento de ensaio.

Tabela 4.2: Classificação da injetabilidade dos *grouts* concebidos a 20°C

<b>AValiação da Injeção – MP Arenoso - 20°C</b>						
<b><i>Grout</i> 2%SP + Silicone</b>	<b>Tempo de repouso (min)</b>	<b>Altura alcançada (mm)</b>	<b>Tempo de escoamento (s)</b>	<b>Volume recolhido (ml)</b>	<b>Caudal (ml/s)</b>	<b>Classificação da injeção</b>
<b>sil 1:2</b>	0	300	29	-	-	<b>DIFÍCIL</b>
	60	220	64	-	-	<b>DIFÍCIL</b>
<b>sil 1:4</b>	0	300	11	-	-	<b>DIFÍCIL</b>
	60	275	84	-	-	<b>DIFÍCIL</b>
<b>sil 1:6</b>	0	350	36	-	-	<b>POSSÍVEL</b>
	60	350	67	-	-	<b>POSSÍVEL</b>

Para a temperatura de 20°C observa-se novamente que apenas a mistura com traço de 1:6 foi a única capaz de alcançar a altura máxima na coluna, no entanto não foi possível retirar qual volume em excesso. Observa-se ainda um aumento da velocidade do escoamento e da altura atingida, quando a temperatura foi aumentada de 5°C para 20°C para o tempo de repouso correspondente a 0 minutos. Segundo Baltazar (2014), este aumento de temperatura permite uma redução da tensão de cedência e da viscosidade plástica do *grout*, conferindo ao material um aumento de fluidez. Este aumento de fluidez melhora consideravelmente a injetabilidade através do meio poroso, daí terem sido observados aumentos na altura alcançada pelo *grout* na coluna, e menores tempos de escoamento para ambos os tempos de repouso. No entanto, estes resultados não foram verificados para o *grout* com traço de 1:4. Como já abordado, esta suspensão apresenta instabilidade considerável, o que poderá justificar esta ocorrência.

Por último, apresentam-se os resultados registados para a temperatura de 40°C expostos nas figuras 4.15 e 4.16.

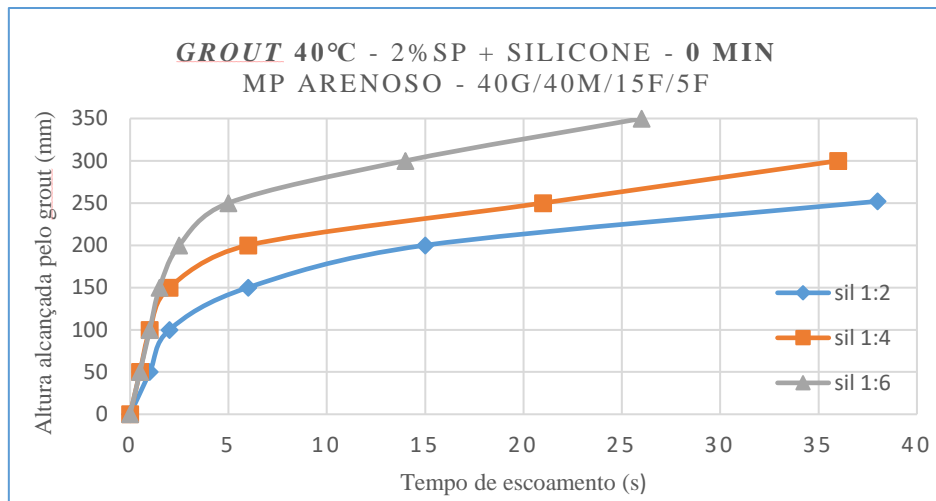


Figura 4.15: Curvas de injetabilidade obtidas para os *grouts* a 40°C e tempo de repouso de 0 minutos em meio poroso arenoso

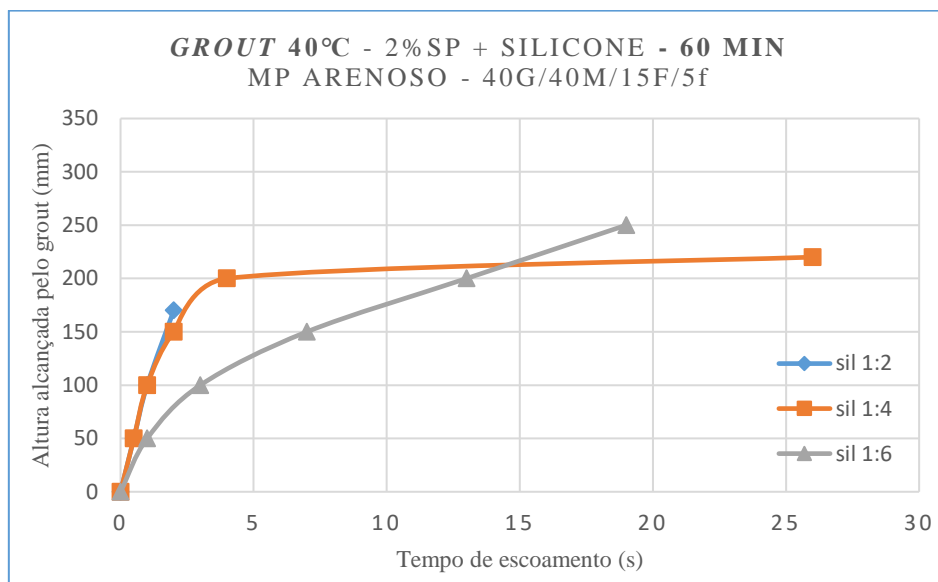


Figura 4.16: Curvas de injetabilidade obtidas para os *grouts* a 40°C e tempo de repouso de 60 minutos em meio poroso arenoso

Na figura 4.15, verifica-se que os *grouts* com maior concentração de hidrófugo (1:2 e 1:4) apresentam velocidades de escoamento e alturas alcançadas inferiores às obtidas para a temperatura de 20°C. Porém, o mesmo não se verifica para o *grout* com traço 1:6. O facto de a concentração de hidrófugo ser menor, permite que *grout* apresente uma melhor fluidez face às restantes concentrações. Logo após a amassadura, este aumento de temperatura (de 20°C para 40°C) constitui-se como favorável ao nível da facilidade de escoamento numa fase inicial do processo de hidratação da calda (Neno, 2016), devido ao aumento da agitação térmica conferido pelo aumento de temperatura, refletindo-se em velocidades de escoamento superiores.

Após um tempo de repouso de 60 minutos, como esperado, a capacidade de injeção do *grout* é bastante reduzida, apresentando-se o fenômeno de floculação com particular importância (Van Rickstal, 2000). Para temperaturas elevadas, as forças de atração entre partículas são mais fortes que a ação repulsiva do superplastificante originando um maior estado de floculação conduzindo a uma menor capacidade de escoamento e injetabilidade (Baltazar, 2014).

Tabela 4.3: Classificação da injetabilidade dos *grouts* concebidos a 40°C

<b>AValiação da Injeção – MP Arenoso - 40°C</b>						
<b>Grout - 2%SP + Silicone</b>	<b>Tempo de repouso (min)</b>	<b>Altura alcançada (mm)</b>	<b>Tempo de escoamento (s)</b>	<b>Volume recolhido (ml)</b>	<b>Caudal (ml/s)</b>	<b>Classificação da injeção</b>
<b>sil 1:2</b>	0	252	38	-	-	<b>DIFÍCIL</b>
	60	170	2	-	-	<b>DIFÍCIL</b>
<b>sil 1:4</b>	0	300	36	-	-	<b>DIFÍCIL</b>
	60	220	26	-	-	<b>DIFÍCIL</b>
<b>sil 1:6</b>	0	350	26	-	-	<b>POSSÍVEL</b>
	60	250	19	-	-	<b>DIFÍCIL</b>

Através da tabela 4.3 observa-se que para uma temperatura de 40°C, de acordo com o esperado, a influência do tempo de repouso é muito mais acentuada relativamente às temperaturas de 5°C e 20°C. O estado de floculação conferido pelo tempo de repouso, combinado com a rápida hidratação da mistura promovida pela temperatura, promoveu um decréscimo nas propriedades do *grout* no estado fresco, aumentado a sua viscosidade e consequentemente reduzindo a capacidade de escoamento (Jorne, 2016). É possível afirmar que o aumento da concentração da solução de hidrófugo adicionado ao *grout* na sua amassadura prejudica a injetabilidade da mistura, não sendo capaz de atrasar as reações de hidratação. Assim apresenta-se o *grout* com traço de 1:6 com o melhor comportamento a nível de injetabilidade, seguido do *grout* com traço de 1:4.

#### 4.2.5.2. Injeção com material cerâmico

Durante esta segunda fase do ensaio, todas as injeções foram efetuadas com um meio poroso composto por material cerâmico (tijolo britado). Dada a sua capacidade de absorção de água, este tipo de material foi adotado numa tentativa de avaliar a influência da adição de hidrófugo na injetabilidade do *grout*. O meio poroso adotado foi idealizado por Jorne (2016) contemplando uma distribuição de 2/3 de material grosso (G) e 1/3 de material fino (F) com as granulometrias apresentadas anteriormente (vd. 3.2.5).

Nas figuras 4.17 e 4.18 encontram-se expostas as curvas de injetabilidade obtidas para um meio poroso composto por material cerâmico injetado pelos diferentes *grouts* concebidos à temperatura de 5°C.

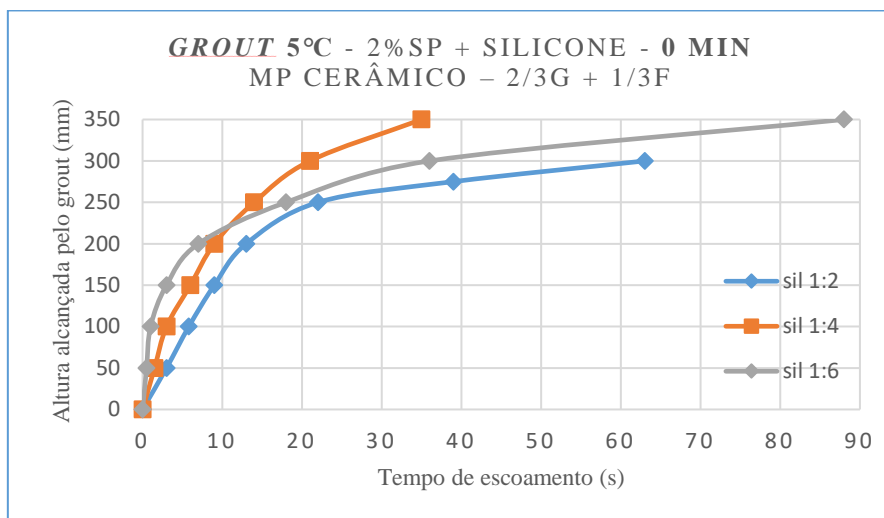


Figura 4.17: Curvas de injetabilidade obtidas para os *grouts* a 5°C e tempo de repouso de 0 minutos em meio poroso cerâmico

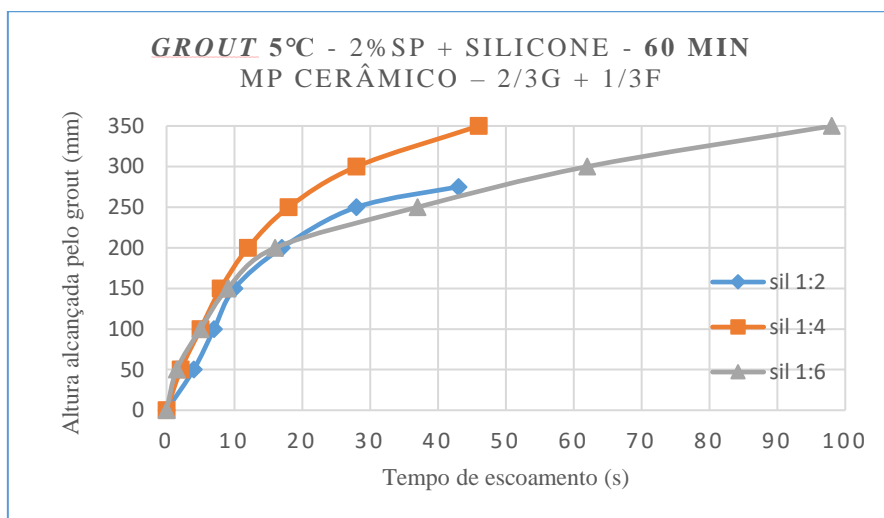


Figura 4.18: Curvas de injetabilidade obtidas para os *grouts* a 5°C e tempo de repouso de 60 minutos em meio poroso cerâmico

Através das curvas de injetabilidade verifica-se que os escoamentos para os dois tempos de repouso (0 e 60 minutos) são bastante semelhantes. Em ambos os casos o *grout* que contempla hidrófugo de superfície num traço de 1:2 é o que apresente injetabilidade mais reduzida, essencialmente devido à viscosidade da mistura. Mais uma vez se verifica que para a temperatura de 5°C, e apesar da alteração do meio poroso, o *grout* com traço de 1:4 de hidrófugo é o que apresenta um nível de injeção mais elevado, ou seja, atingindo a altura máxima num intervalo de

tempo reduzido. Este acontecimento, de igual forma ao ocorrido para a injeção no meio poroso composto por areia, deve-se acima de tudo à instabilidade da mistura.

Tabela 4.4: Classificação da injetabilidade dos *grouts* concebidos a 5°C

<b>AVALIAÇÃO DA INJEÇÃO - MP CERÂMICO - 5°C</b>						
<b><i>Grout</i> 2%SP + Silicone</b>	<b>Tempo de repouso (min)</b>	<b>Altura alcançada (mm)</b>	<b>Tempo de escoamento (s)</b>	<b>Volume recolhido (ml)</b>	<b>Caudal (ml/s)</b>	<b>Classificação da injeção</b>
<b>sil 1:2</b>	0	300	63	-	-	<b>DIFÍCIL</b>
	60	275	43	-	-	<b>DIFÍCIL</b>
<b>sil 1:4</b>	0	350	35	-	-	<b>POSSÍVEL</b>
	60	350	46	-	-	<b>POSSÍVEL</b>
<b>sil 1:6</b>	0	350	88	-	-	<b>POSSÍVEL</b>
	60	350	98	-	-	<b>POSSÍVEL</b>

Com os resultados alcançados verifica-se que a alteração do tipo de meio poroso tem influência na injetabilidade do *grout*. As injeções apresentam as mesmas tendências, no entanto, com alturas de injeção na coluna mais reduzidas e tempos de escoamento mais rápidos. O facto do material cerâmico apresentar maior porosidade e superfície específica relativamente à areia faz com que este material apresente maior resistência ao escoamento. Apesar da adição de silicone na amassadura do *grout*, e contrariamente ao ocorrido com a areia, todas as injeções são classificadas como “difíceis” à exceção da mistura com traço 1:6. A adição deste material em concentração reduzida foi suficiente para que o *grout* após a amassadura fosse capaz de alcançar o nível de injeção desejado. Para concentrações mais elevadas, o aumento de viscosidade conferido ao *grout* configura-se como um entrave na qualidade da injeção.

Seguidamente expõem-se os resultados obtidos para as injeções efetuadas para a temperatura de 20°C e respetivas curvas de injetabilidade.



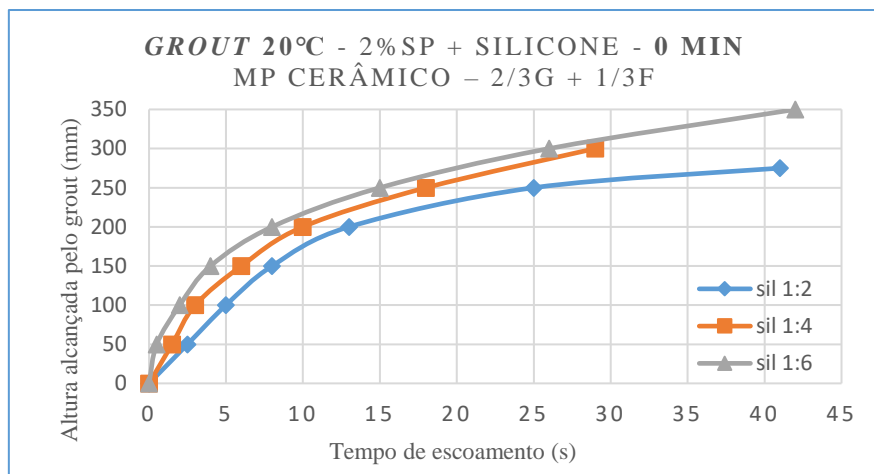


Figura 4.19: Curvas de injetabilidade obtidas para os *grouts* a 20°C e tempo de repouso de 0 minutos em meio poroso cerâmico

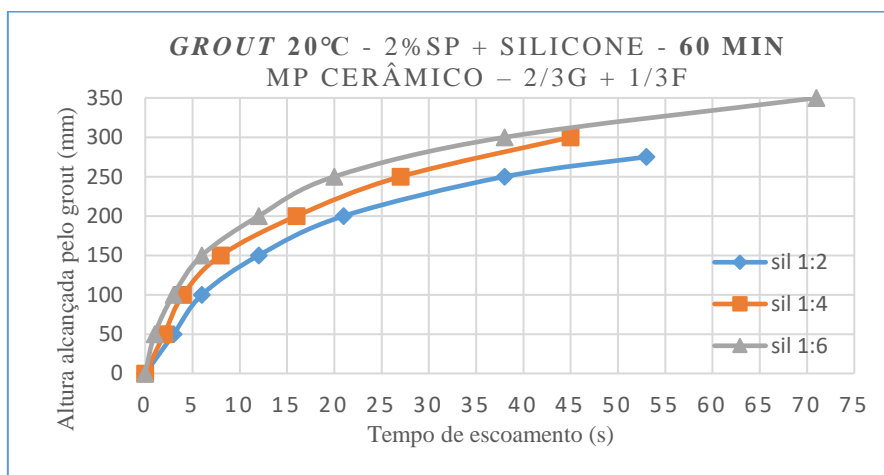


Figura 4.20: Curvas de injetabilidade obtidas para os *grouts* a 20°C e tempo de repouso de 60 minutos em meio poroso cerâmico

Tabela 4.5: Classificação da injetabilidade dos *grouts* concebidos a 20°C

AVALIAÇÃO DA INJEÇÃO - MP CERÂMICO - 20°C						
<i>Grout</i> 2%SP + Silicone	Tempo de repouso (min)	Altura alcançada (mm)	Tempo de escoamento (s)	Volume recolhido (ml)	Caudal (ml/s)	Classificação da injeção
sil 1:2	0	275	41	-	-	DIFÍCIL
	60	275	53	-	-	DIFÍCIL
sil 1:4	0	300	29	-	-	DIFÍCIL
	60	300	45	-	-	DIFÍCIL
sil 1:6	0	350	42	-	-	POSSÍVEL
	60	350	71	-	-	POSSÍVEL

Apresenta-se como notória a influência do tempo de repouso e do silicone na qualidade da injeção apesar do aumento da temperatura de 5°C para 20°C. A capacidade de escoamento vai sendo reduzida proporcionalmente ao aumento do tempo de repouso e ao aumento da concentração de silicone. Apesar da temperatura de 20°C ser a que confere ao *grout* à base de cal hidráulica melhores propriedades no estado fresco (Baltazar, 2014; Jorne, 2016) os aumentos do tempo de repouso e da concentração de silicone prejudicaram a qualidade da injeção. De acordo com a classificação sugerida por Biçer-Şimşir e Rainer (2013), apenas a mistura com traço 1:6 silicone se configura como “Possível injeção”.

Por último são apresentados os resultados obtidos para as injeções efetuadas à temperatura de 40°C.

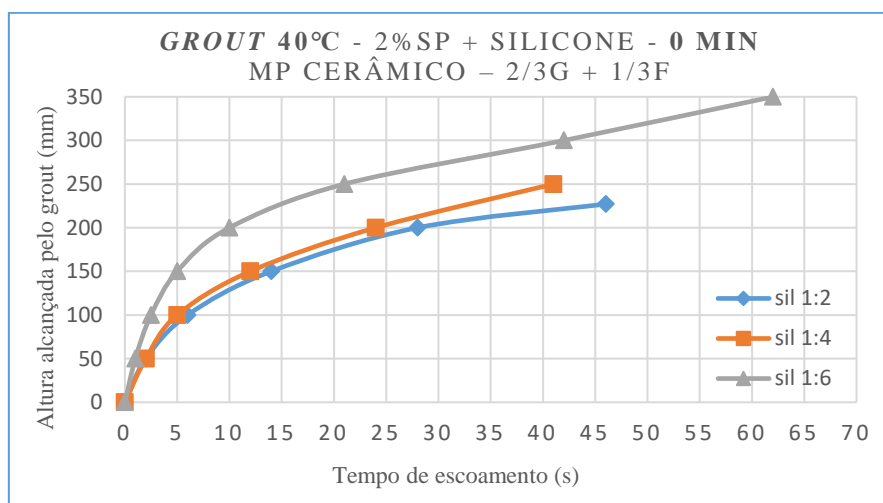


Figura 4.21: Curvas de injetabilidade obtidas para os *grouts* a 40°C e tempo de repouso de 0 minutos em meio poroso cerâmico

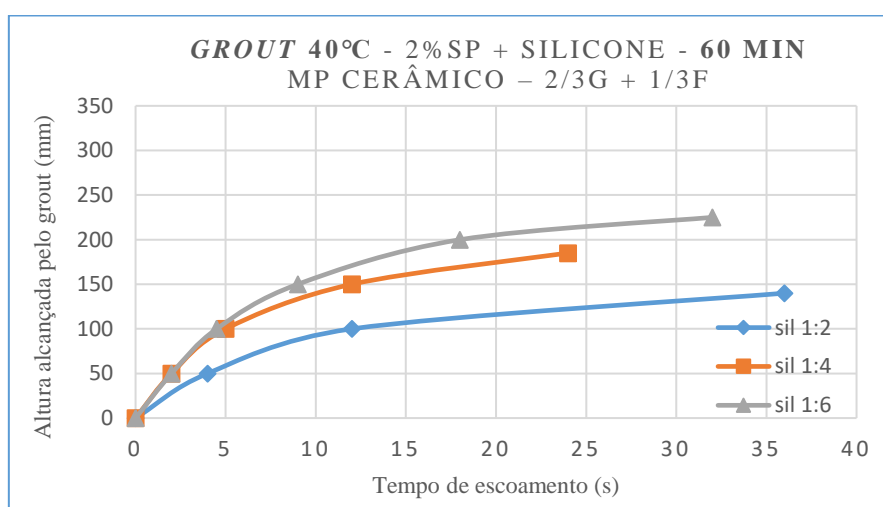


Figura 4.22: Curvas de injetabilidade obtidas para os *grouts* a 40°C e tempo de repouso de 60 minutos em meio poroso cerâmico

Tabela 4.6: Classificação da injetabilidade dos *grouts* concebidos a 40°C

<b>AValiação da Injeção – MP CERÂMICO - 40°C</b>						
<b>Grout 2%SP + Silicone</b>	<b>Tempo de repouso (min)</b>	<b>Altura alcançada (mm)</b>	<b>Tempo de escoamento (s)</b>	<b>Volume recolhido (ml)</b>	<b>Caudal (ml/s)</b>	<b>Classificação da injeção</b>
<b>sil 1:2</b>	0	227	46	-	-	<b>DIFÍCIL</b>
	60	140	36	-	-	<b>DIFÍCIL</b>
<b>sil 1:4</b>	0	250	41	-	-	<b>DIFÍCIL</b>
	60	185	24	-	-	<b>DIFÍCIL</b>
<b>sil 1:6</b>	0	350	62	-	-	<b>POSSÍVEL</b>
	60	225	32	-	-	<b>DIFÍCIL</b>

Como esperado, a alteração do meio poroso apenas apresenta influência essencialmente no tempo de escoamento, devido à maior dificuldade de percolação do *grout* através dos vazios do material relativamente à areia. O tempo de repouso é o parâmetro mais marcante para os *grouts* concebidos a temperaturas elevadas. As rápidas reações de hidratação e a evaporação de água são fatores que proporcionam um aumento do estado de floculação, que consequentemente reduz a fluidez e capacidade de escoamento do *grout*. A adição de silicone, para além de aumentar a viscosidade da mistura (Neno, 2016), não foi suficiente para atrasar as reações de hidratação, nem evitar que parte da água de amassadura fosse absorvida pelo meio poroso, apresentando o *grout* fluidez insuficiente para possibilitar o escoamento através do meio poroso. Apenas para um tempo de repouso de 0 minutos, e para uma quantidade de silicone reduzida, o *grout* foi capaz de alcançar a altura máxima da coluna. Contudo, não foi o suficiente para que ocorresse recolha de material para o exterior da coluna de injeção.

#### 4.3. Avaliação das propriedades do *grout* no estado endurecido

##### 4.3.1. Ensaios de resistência à flexão e compressão

Com vista a aprofundar o estudo do efeito quer da temperatura como da adição de silicone, diretamente na mistura do *grout*, realizaram-se ensaios de resistência à flexão e resistência à compressão para os diferentes *grouts* no seu estado endurecido, através de provetes prismáticos após um período de cura de 28 dias.

Na tabela 4.7 encontram-se expostos os resultados referentes aos dois ensaios, correspondendo estes ao valor médio obtido para três provetes prismáticos para cada um dos *grout* concebidos.

Tabela 4.7: Resultados obtidos para as tensões de resistência à flexão e resistência à compressão para as diferentes misturas de *grout*

	<b>DIFERENTES <i>GROUTS</i> ANALISADOS</b> <b>(2% SP + Silicone)</b>								
<b>Temperatura (°C)</b>	<b>5°C</b>			<b>20°C</b>			<b>40°C</b>		
<b>Traço (silicone/água)</b>	<b>1:2</b>	<b>1:4</b>	<b>1:6</b>	<b>1:2</b>	<b>1:4</b>	<b>1:6</b>	<b>1:2</b>	<b>1:4</b>	<b>1:6</b>
<b>Tensão de Resistência à flexão (MPa)</b>	0,32	0,57	0,72	0,56	0,62	1,23	0,28	0,47	0,65
<b>Tensão de Resistência à compressão (MPa)</b>	2,83	3,32	3,83	3,06	3,54	4,86	2,35	3,08	3,16

Por observação dos resultados é possível estabelecer duas tendências para ambos os ensaios. A primeira diz respeito à temperatura de preparação do *grout*, verificando-se que ocorre um aumento dos valores de tensão entre as temperaturas de 5°C e 20°C e em seguida uma diminuição das tensões na passagem da temperatura de 20°C para 40°C. A temperatura de cura tem grande influência na estabilidade e no processo de hidratação (Rojas & Cabrera, 2002). No caso da temperatura de 40°C, a rápida hidratação na fase inicial do processo de cura causa uma maior deposição dos produtos de hidratação originando uma distribuição mais heterógena destes produtos, resultando numa maior porosidade e ligações mais fracas (Lothenbach et al, 2007). Assim, são obtidos os menores valores de resistência mecânica para temperaturas mais elevadas. Quando a temperatura é muito reduzida, neste caso 5°C, ao contrário de temperaturas elevadas, o processo de hidratação das partículas de ligante é mais lento, resultando na distribuição mais homogênea dos produtos de hidratação. Logo, são adquiridas melhores ligações e uma porosidade mais reduzida, favorecendo as resistências mecânicas (Lothenbach et al, 2007; Jorne, 2016). Para a temperatura de 20°C foram registados os valores mais altos. Segundo alguns autores (Jorne, 2016; Baltazar, 2014; Mirza et al., 2013) esta é considerada como a temperatura de cura ideal para o *grout* à base de cal hidráulica.

A segunda tendência observada na tabela 4.7 diz respeito à variação da dosagem de silicone na mistura. É possível concluir que adições mais concentradas deste material na amassadura do *grout* prejudica as resistências mecânicas. Através dos ensaios protagonizados aos provetes de *grout* torna-se possível afirmar que o silicone prejudica a qualidade da ligação entre as partículas de cal hidráulica durante o processo de hidratação. Na tabela 4.8 encontram-se expostos os resultados obtidos por Jorne (2016) e Neno (2016) para os ensaios de resistência à flexão e resistência à compressão

Tabela 4.8 - Resultados obtidos por Jorne (2016) e Neno (2016) para *grouts* com 1,2% superplastificante

<b><i>Grout</i> com 1,2% superplastificante</b>	<b>Neno (2016)</b>			<b>Jorne (2016)</b>		
	Temperatura (°C)			Temperatura (°C)		
	5	20	40	5	20	40
<b>Tensão de resistência à flexão (MPa)</b>	0,97	2,36	0,49	1,71	2,36	0,91
<b>Tensão de resistência à compressão (MPa)</b>	3,60	5,32	1,87	3,90	5,32	2,87

Comparando os resultados expostos na tabela anterior, para a mistura de *grout* considerada como ideal, com os resultados apresentados na tabela 4.7, é possível observar, de uma forma geral, uma redução nos valores obtidos para as resistências mecânicas. Torna-se assim possível concluir que adição de silicone, tanto em elevadas como em reduzidas concentrações, não apresenta benefícios ao nível das resistências mecânicas do *grout* quando este se encontra no estado endurecido. No entanto, estes valores não apresentam grande expressão na técnica de injeção de *grout*, na qual se considera a injetabilidade como parâmetro chave para o sucesso de uma intervenção deste tipo (Kalagri et al., 2010).

#### 4.3.2. Ensaio de porosidade aberta

Após realizados os ensaios destrutivos, para determinação das resistências mecânicas, foi conduzido o ensaio para determinar a porosidade aberta dos diferentes *grouts* no seu estado endurecido. Na tabela 4.9 são apresentados os valores de porosidade aberta obtidos através da média de três amostras para cada uma das diferentes misturas.

Tabela 4.9: Resultados obtidos para a porosidade aberta das diferentes misturas de *grout*

<b>Porosidade Aberta (%)</b> ( <i>Grouts</i> com 2% SP + Silicone)			
Temperatura °C	Traço (Silicone/Água)		
	1:2	1:4	1:6
5	46,5	46,1	45,7
20	45,8	44,6	43,7
40	48,3	47,9	47,5

Os valores alcançados para a porosidade aberta confirmam os resultados obtidos para as resistências mecânicas. Para valores de porosidade aberta superiores, ou seja, com volume de vazios mais elevado, os resultados obtidos para as resistências mecânicas foram mais reduzidos. Verifica-se que à medida que é incrementada a concentração de silicone na mistura, ocorre uma redução da qualidade da ligação entre as partículas de ligante durante o processo de cura, resultando num grau de compactação mais reduzido e uma porosidade mais acentuada ao nível da microestrutura do *grout*. Os valores de porosidade aberta também aumentam com a temperatura. Estes resultados vão ao encontro com os obtidos por outros autores (Jorne, 2016; Neno, 2016), apresentados na tabela seguinte.

Tabela 4.10: Valores de porosidade aberta obtidos por Jorne (2016) e Neno (2016) para *grouts* com 1,2% superplastificante concebidos a diferentes temperaturas

<b>Porosidade Aberta (%)</b> <i>(Grout com 1,2% SP)</i>		
Temperatura (°C)		
5	20	40
48,8	47,6	50,7

Contudo, os resultados obtidos por estes autores são ligeiramente superiores aos alcançados no presente trabalho em que se adicionou silicone na mistura do *grout*. Esta ligeira redução da porosidade aberta, ou seja, do volume de vazios, apresentado pelo *grout* com adição de silicone, pode dever-se ao facto de este material ter impedido a saturação total das amostras. Ao alterar-se o ângulo de contacto, neste caso tendo sido aumentado, a capacidade de absorção de água por parte dos provetes é mais reduzida, dificultando a penetração da água. Este acontecimento leva a valores mais reduzidos para a massa saturada podendo adulterar os resultados do ensaio de porosidade aberta.

#### 4.3.3. Ensaio de retração

Como mencionado anteriormente no capítulo referente à campanha experimental (vd. 3.3.4), o presente ensaio tem como objetivo avaliar a estabilidade volumétrica de *grouts* de injeção.

Para cada uma das diferentes misturas de *grout* idealizadas foram concebidas duas amostras (taças), um total de 18 taças. Foram igualmente ensaiadas duas amostras de *grout* contendo 1,2%

de superplastificante (1,2% SP), sem adição de silicone, concebidas à temperatura de 20°C. Estas amostras foram utilizadas como referência, pois segundo os estudos conduzidos por alguns autores (Telha, 2015; Jorne, 2016) foi considerada como a dosagem de *grout* que apresentou o melhor comportamento não só no estado fresco como no estado endurecido.

Seguindo o procedimento de ensaio, após a cura do *grout*, foram medidas a máxima separação entre o *grout* e a cavidade do meio poroso e a maior fenda apresentada na amostra de *grout*. De forma a obter uma medição mais precisa e eficaz utilizou-se uma craveira digital, como ilustrado na figura 4.23. Este aparelho tornou também possível o registo do abatimento ocorrido no centro das amostras através da medição da profundidade observada no centro das amostras.



Figura 4.23: Registo das dimensões de afastamento, fenda e profundidade nas amostras de *grout*

Na tabela seguinte são apresentadas as respetivas classificações conferidas às amostras em função dos valores obtidos para as dimensões dos afastamentos entre o *grout* e a cavidade, as fendas apresentadas e os abatimentos ocorridos nas amostras. Salienta-se que os valores apresentados são os valores médios obtidos das duas taças concebidas para cada uma das diferentes amostras.

Tabela 4.11: Classificação da retração dos diferentes *grouts*

Grout			Fenda máx. (mm)	Afastamento máx. (mm)	Abatimento (mm)	CLASSIFICAÇÃO DA AMOSTRA
Temperatura (°C)	SP (%)	Traço (s:a)				
20	1,2%	-	-	0,90	3,14	MS
5	2%	1:2	0,72	0,65	7,23	HS
		1:4	0,67	1,07	9,47	HS
		1:6	0,55	0,55	6,58	HS
20		1:2	0,47	1,06	8,65	HS
		1:4	0,34	0,85	13,29	HS
		1:6	-	0,68	7,72	MS
40		1:2	0,93	0,86	6,82	HS
		1:4	0,94	0,99	5,43	HS
		1:6	0,81	0,71	7,93	HS

Em primeiro lugar, através dos resultados reportados na tabela anterior, foi possível observar que em todas as amostras ocorreu um ligeiro abatimento na zona correspondente ao centro da amostra, como ilustrado na Figura 4.24.

Figura 4.24: Abatimento apresentado no centro da amostra de *grout*

Este abatimento ocorreu logo após a introdução da amostra na cavidade, podendo dever-se à adesão da amostra com o meio poroso na zona periférica, encontrando-se o *grout* em suspensão na zona central da cavidade. Contudo, este fenómeno foi mais pronunciado para algumas misturas. Esta ocorrência poderá também ter ocorrido devido à porosidade apresentada pelo meio poroso, que permitiu que parte da amostra preenche-se uma parte dos seus vazios.



Analisando a amostra de referência, concebida à temperatura de 20°C e sem adição de silicone, é possível observar através da Figura 4.25 que a fendilhação apresentada é bastante reduzida relativamente às restantes amostras.



Figura 4.25: *Grout* com 1,2% superplastificante concebido a 20°C

Esta amostra não apresentou fendilhação superficial mas a separação entre o *grout* e o meio poroso foi relativamente elevada. Dados estes dois aspetos, e contrariamente ao recomendado pela norma de ensaio, optou-se por classificar a retração desta amostra como média retração (*Medium Shrinkage* – MS). Resultados obtidos por outros autores (Neno, 2016; Jorne, 2016) mostraram que para diferentes temperaturas, aos 28 dias de cura, uma mistura de *grout* com 1,2% de superplastificante, foi a que obteve os melhores resultados em termos de variação da massa, pois foi a que apresentou uma tendência de evaporação da sua água de uma forma mais progressiva e conveniente.

As figuras seguintes (figuras 4.26, 4.27 e 4.28) são representativas de algumas amostras obtidas para diferentes temperaturas e dosagens de hidrófugo.



Figura 4.26: Retração apresentada pelo *grout* com 2% superplastificante, traço 1:4 (silicone/água), concebido a 5°C



Figura 4.27: Retração apresentada pelo *grout* com 2% superplastificante, traço 1:6 (silicone/água), concebido a 20°C



Figura 4.28: Retração apresentada pelo *grout* com 2% superplastificante, traço 1:2 (silicone/água), concebido a 40°C

Os *grouts* que apresentam maior retração são os concebidos à temperatura de 40°C. Estas observações vêm corroborar tanto os resultados obtidos para as resistências à flexão e compressão. (vd. 4.3.1.). Os valores mais elevados de retração, apresentados para o *grout* concebido a esta temperatura, podem dever-se ao facto de a evaporação de água em excesso ocorrer de uma forma mais repentina promovida pela temperatura elevada. Para 5°C, apesar de os *grouts* terem classificação de elevada retração (*High Shrinkage* – HS), os valores obtidos para o afastamento, maior fenda e abatimento, são mais reduzidos que os apresentados aos 40°C

Através dos resultados alcançados torna-se possível concluir, que a temperatura ideal para a conservação da estabilidade volumétrica da mistura, como também para otimização do processo de cura, é a temperatura de 20°C.

Relativamente à influência da adição de silicone, constata-se que à medida que a dosagem de silicone vai sendo reduzida a retração vai sendo menor. A adição de hidrófugo, dadas as suas características intrínsecas, deveria promover uma maior retenção de água de forma a minimizar o fenómeno de retração. Contudo, a instabilidade exibida pelas misturas conferida pelas elevadas concentrações deste material sobrepõe-se à sua capacidade de retenção de água, possibilitando que ocorra uma acentuada retração por parte do *grout* durante o seu processo de cura.

Posto isto, é possível afirmar que a temperatura possui maior influencia na retração apresentada pelas amostras de *grout* no presente ensaio do que a dosagem de hidrófugo adicionada no processo de mistura.

Estes resultados, em conjunto com os obtidos para a porosidade aberta, vêm corroborar os valores alcançados para as resistências mecânicas, concluído-se que o nível de retração apresentado tem grande influência nas resistências mecânicas obtidas para os diferentes *grouts* (Brás, 2011; Mirza et al., 2013), devido ao baixo grau de compactação conferido pela retração do *grout*.

Em convergência com os resultados obtidos nos ensaios de estado fresco, o *grout* que apresenta melhor comportamento relativamente à retração é o que contém um traço de silicone de 1:6 preparado à temperatura de 20°C.

## 5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Como mencionada anteriormente, a presente dissertação tem como objetivo avaliar a influência da temperatura, do tempo de repouso e a adição de diferentes dosagens de silicone (adicionado diretamente na amassadura do *grout*) nas propriedades fundamentais dos *grouts* de injeção. Partindo dos objetivos expostos ao longo deste trabalho pretendeu-se otimizar a formulação de *grout* com a finalidade de melhorar as propriedades fundamentais deste material de forma a potenciar o sucesso global deste tipo de intervenção. Após concluída a campanha experimental e a análise dos resultados obtidos para a totalidade dos ensaios, no presente capítulo são apresentadas as conclusões finais alcançadas. No presente capítulo são ainda sugeridos alguns desenvolvimentos futuros, com o intuito de aprofundar o conhecimento no âmbito da adição de silicone na amassadura do *grout* e a sua influência no desempenho de *grouts* de injeção.

### 5.1. Conclusões relativas às propriedades do *grout*

No que diz respeito aos ensaios protagonizados para avaliação da fluidez do *grout* (cone de Marsh e espalhamento) foi possível retirar as mesmas conclusões relativas ao efeito combinado entre a temperatura e o tempo de repouso. Observa-se que independentemente da dosagem de silicone adicionada, existe uma maior tendência para a ocorrência de perda de fluidez à medida que o tempo de repouso aumenta apesar de ter sido usado superplastificante na mistura. Esta perda é fruto do maior estado de floculação do *grout* ao dar-se início ao processo de hidratação da cal hidráulica. Constatou-se, que as maiores perdas de fluidez se encontram associadas às temperaturas extremas de 5°C e 40°C. Para a temperatura de 5°C, as diferenças na perda de fluidez não são muito significativas mesmo para um tempo de repouso de 60 minutos, no entanto verifica-se uma tendência para a perda desta propriedade fundamental do *grout*. Por outro lado, para a temperatura de 40°C os *grouts* já apresentam diferenças acentuadas ao longo do tempo. De uma forma geral, as propriedades do *grout* nos estado fresco sofrem uma melhoria quando é aumentada a temperatura de 5°C para 20°C, apresentando depois um agravamento quando a temperatura é elevada aos 40°C. Torna-se então possível afirmar que tanto a temperatura, como o tempo de repouso, têm grande influência nas propriedades do *grout* no estado fresco, levando a perdas de fluidez. Estes resultados encontram-se em sintonia com os alcançados e trabalhos anteriores, em que foram estudadas diferentes suspensões sem a adição de silicone. No que diz respeito à quantidade de silicone adicionada ao *grout*, verifica-se que a sua adição em grande quantidade não contribui para a melhoria da fluidez da mistura. Apesar de ser um material que dadas as suas características tem a capacidade de aumentar a capacidade de retenção de água da mistura, não permitiu que um acréscimo de fluidez fosse atingido, agravando as propriedades do *grout* através de um aumento de viscosidade.

Relativamente ao ensaio de retenção de água, os valores correspondentes ao volume de água retirado durante o ensaio foram bastante reduzidos, logo, bastante satisfatórios. Assim, torna-se possível afirmar que o incremento da concentração de silicone introduzido diretamente na mistura do *grout* favorece a capacidade de retenção de água da suspensão. Devido aos mesmos fenómenos mencionados anteriormente para as temperaturas extremas, os valores de volume de água retirados são inferiores aos registados para 20°C. Contudo, é possível afirmar que a influência da adição de silicone assume um papel bastante importante nesta propriedade do *grout*.

De forma a verificar a estabilidade das diferentes formulações de *grout* foi conduzido um ensaio de estabilidade de acordo com o mesmo procedimento realizado por outros autores em trabalhos anteriores. Para este ensaio, os resultados registados são considerados como insatisfatórios, à exceção do *grout* concebido à temperatura de 20°C com traço de silicone 1:6 e 2% de superplastificante. Independentemente da temperatura de amassadura verificaram-se variações na ordem dos 30% na massa volúmica das caldas relativamente à inicial. Torna-se assim possível concluir que adições de silicone superiores a um traço de 1:6 (silicone/água), ou seja, quantidades equivalentes a 1/6 da massa total de água de amassadura, conduzem a fenómenos extremos de segregação, prejudicando a qualidade das caldas destinadas à consolidação de alvenarias antigas.

Em seguida, através da tabela 5.1, são apresentadas de uma forma sumária as classificações atribuídas aos *grouts* quanto à sua capacidade de injeção no ensaio de coluna francesa.

Tabela 5.1: Classificação dos *grouts* quanto à injetabilidade em material arenoso

<b>AVALIAÇÃO DOS <i>GROUTS</i> QUANTO À INJETABILIDADE – MP ARENOSO</b>						
<b>Temperaturas de formulação do <i>grout</i></b>	<b>Tempo de repouso - 0 minutos</b>			<b>Tempo de repouso - 60 minutos</b>		
	<b>Classificação da injeção</b>			<b>Classificação da injeção</b>		
	sil 1:2	sil 1:4	sil 1:6	sil 1:2	sil 1:4	sil 1:6
<b>5°C</b>	DIFÍCIL	POSSÍVEL	POSSÍVEL	DIFÍCIL	FÁCIL	POSSÍVEL
<b>20°C</b>	DIFÍCIL	DIFÍCIL	POSSÍVEL	DIFÍCIL	DIFÍCIL	POSSÍVEL
<b>40°C</b>	DIFÍCIL	DIFÍCIL	POSSÍVEL	DIFÍCIL	DIFÍCIL	DIFÍCIL

Tabela 5.2: Classificação dos *grouts* quanto à injetabilidade em material cerâmico

<b>AVALIAÇÃO DOS <i>GROUTS</i> QUANTO À INJETABILIDADE – MP CERÂMICO</b>						
<b>Temperaturas de formulação do <i>grout</i></b>	<b>Tempo de repouso - 0 minutos</b>			<b>Tempo de repouso - 60 minutos</b>		
	<b>Classificação da injeção</b>			<b>Classificação da injeção</b>		
	sil 1:2	sil 1:4	sil 1:6	sil 1:2	sil 1:4	sil 1:6
<b>5°C</b>	DIFÍCIL	POSSÍVEL	POSSÍVEL	DIFÍCIL	POSSÍVEL	POSSÍVEL
<b>20°C</b>	DIFÍCIL	DIFÍCIL	POSSÍVEL	DIFÍCIL	DIFÍCIL	POSSÍVEL
<b>40°C</b>	DIFÍCIL	DIFÍCIL	POSSÍVEL	DIFÍCIL	DIFÍCIL	DIFÍCIL

Em primeiro lugar salienta-se a classificação atribuída ao *grout* preparado a 5°C com traço de silicone 1:4. Para além de ter sido atingida altura máxima na coluna, ainda foi possível recolher um certo volume de *grout* em excesso. Uma razão possível para esta ocorrência encontra-se associada à instabilidade da suspensão. O *grout* ao ser injetado sobre pressão perdeu por completo a sua estrutura interna permitindo a separação entre a sua componente sólida (cal hidráulica) e a componente líquida (água), possibilitando a ocorrência de escoamento, no entanto, de uma forma bastante instável. Este fenómeno pode apresentar-se como explicação para os valores registados para o tempo de escoamento e altura atingida desta mistura. Para os restantes *grouts*, facilmente se conclui que o efeito combinado da temperatura e do tempo de repouso apresentam grande influência na injetabilidade dos *grouts*. Para temperaturas elevadas o tempo de repouso após a amassadura deverá ser o mínimo possível.

Relativamente à adição de silicone diretamente na mistura, com o intuito de melhorar a capacidade de injeção, não foi notória a eficácia desta adição. O aumento da concentração de silicone pressupõe o aumento do ângulo de contacto, verificando-se com base nas classificações obtidas para os ensaios de injetabilidade que esta ação apenas confere benefícios quando a adição de silicone é feita em quantidades reduzidas. Ao serem comparados os ensaios de injeção para os dois meios porosos adotados (arenoso e cerâmico), facilmente se conclui, que a adição de silicone conferiu ao *grout* benefícios em termos de injetabilidade apenas para a quantidade mais reduzida (traço 1:6). As classificações das injeções nos dois meios porosos foram praticamente as mesmas, tendo as injeções apresentado diferenças apenas ao nível do tempo de escoamento, com valores superiores para o meio poroso cerâmico. Estas diferenças foram ao encontro do expectável, dada a maior dificuldade de injeção através de um material com maior rugosidade e capacidade de absorção de água.

Para os ensaios no estado endurecido, relativamente às resistências à flexão e compressão, foi bastante notória a tendência para que ocorresse um incremento das resistências no aumento da

temperatura de 5°C para 20°C e um agravamento dos 20°C para os 40°C. Como anteriormente referido, para temperaturas baixas o processo de hidratação é mais lento, conferido ao *grout* um maior grau de compacidade e consequentemente maiores resistências mecânicas. Por outro lado, para temperaturas elevadas, ocorre não só um processo de cura mais rápido devido ao aumento da velocidade das reações de hidratação, mas também uma maior perda de água por evaporação. Estes dois fenómenos possibilitam a ocorrência de baixas compacidades, refletindo-se em valores mais reduzidos para as resistências mecânicas do *grout* após a sua cura. Estas conclusões foram corroboradas pelos ensaios porosidade aberta e de retração protagonizados, onde se verificou que para a temperatura de 40°C o grau de compactação foi mais reduzido e o nível de retração atingido foi bastante elevado. Relativamente à ação do silicone, quando este material é adicionado no processo de amassadura do *grout*, os valores registados para os ensaios mecânicos vão sendo mais reduzidos à medida que se aumenta a concentração deste material na mistura. O facto de este material prejudicar as ligações entre as partículas de ligante durante o processo de cura tem consequências nos valores obtidos para as tensões de resistência à flexão e compressão.

Após expostas as conclusões relativas a cada um dos ensaios protagonizados, conclui-se, que a adição de silicone em quantidades superiores a um traço de 1:6 conduz a um agravamento das propriedades fundamentais dos *grouts* de injeção no estado fresco. A adição de silicone deverá ser sempre acompanhada pela adição de superplastificante. Posto isto, e com base na globalidade dos ensaios idealizados para avaliação do *grout* na campanha experimental, considera-se que a temperatura ideal para um *grout* com silicone na sua constituição é a de 20°C e que a realização da técnica de injeção, após amassadura, deverá decorrer o mais rapidamente possível.

## 5.2. Sugestões para desenvolvimentos futuros

A presente dissertação, combinada com estudos realizados por outros autores nesta temática, permitiu concluir que adição de silicone, apesar de conferir o melhoramento de algumas características do *grout*, apresenta alguns condicionalismos em termos de estabilidade da suspensão. Contudo, propõe-se que sejam efetuados estudos mais detalhados, nomeadamente em termos reológicos, de forma a averiguar a influência do silicone ao nível das propriedades reológicas do *grout* quando adicionado em diferentes concentrações. Para estes estudos seria também interessante verificar a influência da percentagem de superplastificante.

Considera-se importante realizar ensaios de injeção, para os *grouts* desenvolvidos no presente trabalho, recorrendo a outros tipos de modelo reduzido. Após estas injeções, seria



interessante serem realizados ensaios mecânicos para averiguar a capacidade resistente do conjunto *grout*/meio poroso.

A escolha dos materiais a usar na formulação de *grouts* de injeção, e respetivas quantidades, é um aspeto bastante complexo que requer estudos laboratoriais aprofundados. Como tal, propõe-se também para desenvolvimentos futuros, a elaboração de um estudo comparativo relativamente aos trabalhos já desenvolvidos no Departamento de Engenharia Civil da FCT nesta temática. Neste estudo deverão ser comparados os resultados alcançados em termos de injetabilidade para todas as formulações de *grout* desenvolvidas, através dos diferentes meios porosos que foram utilizados para simular o núcleo de uma parede alvearia de pano múltiplo, focando-se principalmente nas diferenças entre a adição de hidrófugo no meio poroso e adição direta na amassadura do *grout*.

## 6. BIBLIOGRAFIA

American Society for Testing and Materials, (ASTM) – *Standard Test Method for Flow of Grout for Preplaced-Aggregate Concrete*. C 939-02, United States, ASTM, 2002.

American Society for Testing and Materials, (ASTM) – *Standard Test Method for Water Retentivity of Grout Mixture for Preplaced-Aggregate Concrete*. C 941-02, United States, ASTM, 2002.

Assaad, J.; Daou, Y. - *Cement and Concrete Research Cementitious grouts with adapted rheological properties for injection by vacuum techniques*. Cement and Concrete Research, vol. 59, págs. 43–54, 2014.

Baltazar, L.; Henriques, F.; Jorne, F. – *Optimization of flow behaviour and stability of superplasticized fresh hydraulic lime grouts through design of experiments*. Construction and Building Materials, vol. 35, págs. 838-845, 2012.

Baltazar, L.; Henriques, F.; Jorne, F.; Cidade, M. – *The use of rheology in the study of the composition effects on the fresh behaviour of hydraulic lime grouts for injection of masonry walls*. Rheologica Acta, vol. 52, págs. 127-138, 2013a.

Baltazar, L.; Henriques, F.; Jorne, F.; Cidade, M. – *Performance improvement of hydraulic lime based grouts for masonry consolidation: an experimental study*. Structural Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture XIII, vol. 131, págs. 417-430, 2013b.

Baltazar, L. - *Rheology of natural hydraulic lime grouts*. Tese para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2014.

Baltazar, L. G., Henriques, F. M. A., Jorne, F., e Cidade, M. T. - *Combined effect of superplasticizer, silica fume and temperature in the performance of natural hydraulic lime grouts*. Construction and Building Materials, vol. 50, págs. 584–597, 2014.

Baltazar, L.; Henriques, F. - *Rheology of Grouts for Masonry Injection*. Key Engineering Materials, Volume 624, págs. 283–290, 2015.

Baltazar, L.; Henriques, F.; Jorne, F.; Cidade, M. – *Contribution to the design of hydraulic lime-based grouts for masonry consolidation*. Journal of Civil Engineering and Management, vol. 21, págs. 698-709, 2015.

Banfill, P. - *Additivity effects in the rheology of fresh concrete containing water-reducing admixtures*. Construction and Building Materials, vol. 25, págs. 2955–2960, 2011.

Bras, A.; Henriques, F.; Cidade, M. - *Effect of environmental temperature and fly ash addition in hydraulic lime grout behavior*. Construction and Building Materials, Elsevier vol. 24, págs. 1511-1517, 2010.

BASF. MasterGlenium SKY 617, Ficha Técnica, 2014.

Biçer-Şimşir, B.; Griffin, I.; Palazzo-Bertholon, B.; Rainer, L. – *Lime-based injection grouts for the conservation of architectural surfaces*. Studies in Conservation (GETTY), vol. 55, págs. 3-17, 2009.

Biçer-Şimşir, B.; Rainer, L. - *Evaluation of Lime-Based Hydraulic Injection Grouts for the Conservation of Architectural Surfaces. A Manual o laboratory and Field Test Methods, Part I: Laboratory Testing Procedures*. Getty Conservation Institute, págs. 11-17, 2013.

Biçer-Şimşir, B.; Rainer, L. - *Evaluation of Lime-Based Hydraulic Injection Grouts for the Conservation of Architectural Surfaces. A Manual o laboratory and Field Test Methods, Part I: Laboratory Testing Procedures*. Getty Conservation Institute, págs. 83-86, 2013.

Binda, L. - *Repair and investigation techniques for stone masonry walls*. Construction and Building Materials, vol. 11, págs. 133–142, 1997.

Binda, L.; Saisi, A.; Tedeschi, C. – *Compatibility of materials used for repair of masonry buildings: research and applications, In Fracture and Failure of Natural Building Stones: Applications in the Restoration of Ancient Monuments*. Springer, págs. 167-182, 2006.

Bras, A. - *Grout optimization for masonry consolidation*. Tese para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2011.

Bras, A.; Henriques, F. - *Natural hydraulic lime based grouts – The selection of grout injection parameters for masonry consolidation*. Construction and Building Materials, vol. 26, págs. 135–144, 2012.

Cardoso, T. - *Influência da exsudação e da perda de água nas propriedades reológicas de grouts*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre Em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia Da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2015.

Cidade, M. – *Reologia de Polímeros: Texto de Apoio*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2005.

Coelho, P. - *Avaliação da injeção de grouts em alvenarias antigas com ensaios não destrutivos*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre Em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia Da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013.

Collepari, M. – *Admixtures used to enhance placing characteristics of concrete*. Concrete & Concrete Composites, Elsevier, vol. 20, págs. 103-112, 1998.

Coutinho, J. - *Materiais de Construção 2: 1ª Parte – Ligantes e Caldas* - Universidade do Porto, 2006.

Domone, P. – *The slump flow test for high-workability concrete*. Cement and Concrete Research, vol. 28, págs. 177-182, 1998.

Fernández-Altable, V.; Casanova, I. - *Influence of mixing sequence and superplasticiser dosage on the rheological response of cement pastes at different temperatures*. Cement and Concrete Research, vol. 36, págs. 1222–1230, 2006.

Guerreiro, J. - *Avaliação do efeito combinado de temperatura , tempo de repouso e pressão de injeção na eficiência de injeção de grouts*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade nova de Lisboa, 2014.

Greisser, A. - *Cement-Superplasticizer Interactions at ambient temperatures*. Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, 2002.

Groen, J.; Peffer, L.; Perez-Ramirez, J. - *Microporous Mesoporous Materials*, 60, 2003.

Hanehara, S.; Yamada, K. – *Interaction between cement and chemical admixture from the point of cement hydration, absorption behaviour of admixture, and paste rheology*. Cement and Concrete Research, Elsevier, vol. 29, págs. 1159-1165, 1999.

Hanehara, S.; Yamada, K. – *Rheology and early age properties of cement systems*. Cement and Concrete Research, Elsevier, vol. 21, págs. 171-195, 2008.

Henkel. Rubson Silicone Líquido SL3000, Ficha Técnica, 2011.

Henriques, F. - *Comportamento higrotérmico de edifícios*. LNEC, Lisboa, 2011.

Hunter, R. – *Foundations of colloid science*. 2nd ed. New York: Oxford University Press Inc, 2001

Ignoul, S.; Van Gemert, D.; Van Rickstal, F. -. *Application of mineral grouts. case study and impact on structural behaviour: church of St. Catharina at Duisburg (b)*. Proceedings International Seminar IV “Structural Analysis of Historical Constructions”, Padua, 10-12 November 2004, Balkema Publ., págs.719-726, 2004.

IPQ. NP EN 1936 – *Método de ensaio para pedra natural: Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta*. Monte da Caparica, IPQ, 2008

IPQ. NP EN 445 - *Caldas de injeção para armaduras de pré-esforço – Métodos de ensaio*. Monte da Caparica, 2008.

IPQ. NP EN 934-2 – *Adjuvantes para betão, argamassa e caldas de injeção. Parte 2: Adjuvantes para betão. Definições, requisitos, conformidade, marcação e etiquetagem*. Monte da Caparica, 2009.

IPQ. NP EN 459-1:2011 – *Cal de construção. Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade*. Monte da Caparica, IPQ, 2011.

Jorne, F.; Henriques, F.; Baltazar, L. – *Avaliação da técnica de injeção de grout recorrendo ao ensaio de ultra-sons e tomografia ultra-sónica*. In: Congresso Construção 2012, Coimbra, 18-20 de Dezembro, 2012b.

Jorne, F.; Henriques, F.; Baltazar, L. – *Grout injection in porous media with different internal structures*. Proceedings of the 14 th International Conference. Structural Faults & Repair, Scotland, 3 th – 5 th July, 2012a.

Jorne, F.; Henriques, F.; Baltazar, L. - *Evaluation of consolidation of different porous media with hydraulic lime grout injection*. Journal of Cultural Heritage, Volume 16, págs. 438–451, 2015a.

Jorne, F.; Henriques, F.; Baltazar, L. - *Injection capacity of hydraulic lime grouts in different porous media*. Materials and Structures/Materiaux et Constructions, vol. 48, págs. 2211–2233, 2015b.

Jorne, F. - *Injectability of hydraulic lime grouts for masonry consolidation*. Tese para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2016.

Kalagri, A., Miltiadou-Fezans, A., & Vintzileou, E. - *Design and evaluation of hydraulic lime grouts for the strengthening of stone masonry historic structures*. Materials and Structures/Materiaux et Constructions, vol. 43, págs. 1135–1146, 2010.

Lothenbach, B.; Winnefeld, F.; Alder, C.; Wieland, E.; Lunk, P. - *Effect of temperature on the pore solution, microstructure and hydration products of Portland cement pastes*. Cement and Concrete Research, vol. 37, págs. 483–491, 2007.

Luso, E. – *Análise Experimental de Caldas à Base de Cal para Injeção de Alvenaria Antiga*. Tese para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, Universidade do Minho, Minho, 2012.

Mahaut, F.; Mokéddem, S.; Chateau, X.; Roussel, N.; Ovarlez, G. – *Effect of coarse particle volume fraction on the yield stress and thixotropy of cementitious materials*. Cement and Concrete Research, vol. 38, págs. 1276-1285, 2008.

Martins, R.; Bombard, A. – *Rheology of fresh cement paste with superplasticizer and nanosilica admixtures studied by response surface methodology*. Materials and Structures, vol. 45, págs. 905-921, 2011.

Matos, J. - *Efeito da temperatura no comportamento de caldas de injeção à base de cal hidráulica natural na presença de policarboxilato*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre Em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia Da Universidade Nova de Lisboa,

Lisboa, 2013.

Miguel, D. - *Influência do tipo e dosagem de hidrófugo na reologia de caldas de injeção*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre Em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia Da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2017.

Miltiadou-Fezans, A.; Tassios, T. P. - *Fluidity of hydraulic grouts for masonry strengthening*. Materials and Structures/Materiaux et Constructions, vol. 45, págs. 1817-1828, 2012.

Miltiadou-Fezans, A.; Tassios, T. P. - *Stability of hydraulic grouts for masonry strengthening*. Materials and Structures/Materiaux et Constructions, vol. 46, págs. 1631–1652, 2013.

Mirza, J.; Saleh, K.; Langevin, M.-A.; Mirza, S.; Bhutta, M.A.R.; Tahir, M.M. -. *Properties of microfine cement grouts at 4°C, 10°C and 20°C*. Construction and Building Materials, Volume 47, págs. 1145–1153, 2013.

Neno, E. - *Optimização de injeção de grout no âmbito da sua formulação e modo de aplicação*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre Em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia Da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2016.

Papayianni, I.; Pachta, V. -. Experimental study on the performance of lime-based *grouts* used in consolidating historic masonries. Materials and Structures, vol. 48, págs. 2111–2121, 2014.

Rodrigues, M. - *Argamassas de revestimento para alvenarias antigas - Contribuição para o estudo da influência dos ligantes*. Tese para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2004.

Roncero, J. – *Effect of superplasticizers on the behaviour of concrete in fresh and hardened states: implication for high performance concretes*. Doctoral Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2000.

Roussel, N.; Cussigh, F. - *Distinct-layer casting of SCC: The mechanical consequences of thixotropy*. Cement and Concrete Research, vol. 38, págs. 624-632, 2008.

Roussel, N.; Lemaître, A.; Flatt, R.J.; Coussot, P. -. *Steady state flow of cement suspensions: A micromechanical state of the art*. Cement and Concrete Research, vol. 40, págs. 77–84, 2010.

Sakai, E; Yamada, K.; Ohta, A. - *Molecular Structure and Dispersion-Adsorption Mechanisms of Comb-Type Superplasticizers Used in Japan*. Journal of Advance Concrete Technology, vol. 1, págs. 16-25, 2003.

Silva, T. - *Optimização da influência do ângulo de contacto na injectabilidade de grouts*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre Em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia Da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2016.

Telha, F. - *Análise da influência da alteração do ângulo de contacto na injectabilidade de grouts*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2015.

Toumbakari et al., E.-E. - *Methodology for the design of injection grouts for consolidation of ancient masonry*. In International RILEM Workshop on Historic Mortars: Characteristics and Tests: Paisley, Scotland, 12th-14th May 1999.

Toumbakari, E. - *Lime-pozzolan-cement grouts and their structural effects on composite masonry walls*. PhD Thesis, Department of Civil Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium, 2002

Toumbakari, E.; Van Gemert, D.; Tassios, T.; Vintzileou, E. – *Experimental investigation and analytical modeling of the effect of injection grouts on the structural behaviour of three-leaf masonry walls*. Structural Analysis of Historical Constructions, London, págs. 707-718, 2005

Torraca, G. - *Lectures on Materials Science for Architectural Conservation*, vol. 1, 2009.

Vieira, J. - *Interação Cimento-Superplastificante: Avaliação da estabilidade do comportamento*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2010

Valluzzi, M. - *Requirements for the choice of mortar and grouts for consolidation of threeleaf stone masonry walls*. Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, 2005.

Valluzzi, M. - *Requirements for the choice of mortar and grouts for consolidation of three-leaf stone masonry walls*. RILEM Publications SARL, 26th-28th January, 2009.



Van Rickstal, F. - *Grout Injection of Masonry, scientific approach and modeling*. Doctoral Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, 2000.

Vikan, H. -. *Rheology and reactivity of cementitious binders with plasticizers*. Doctoral Theses at Norwegian University of Science and Technology, 2005.

Vintzileou, E. – *Grouting of Three-Leaf Stone Masonry: Types of Grouts, Mechanical properties of Masonry before and after Grouting*. Proc. of the 5th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, New Delhi, 2006.

Vintzileou, E. -. *Three-Leaf Masonry in Compression, Before and After Grouting: A Review of Literature*. International Journal of Architectural Heritage, Volume 5, págs. 513–538, 2011.

Wallevik, J. - *Rheological properties of cement paste: Thixotropic behavior and structural breakdown*. Cement and Concrete Research, vol. 39, págs 14-29, 2009.

Yamada, K.; Yanagisawa, T.; Hanehara, S. – *Influence of temperature on the dispersibility of polycarboxylate type superplasticizer for high fluid concrete*. In: 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Estocolmo, Suécia, 1999.

Yamada, K.; Takahashi, T.; Hanehara, S.; Matsuhisa, M. – *Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer*. Cement and Concrete Research, vol. 30, págs. 197-207, 2000.

Yamada, K. – *Basics of analytical methods used for the investigation of interaction mechanism between cements and superplasticizers*. Cement and Concrete Research, Elsevier, vol. 41, págs. 793-798, 2011.